

Ткачук Н. А., Дьяченко С. С., Посвятенко Э. К., Кравченко С. А.,
Гончаров В. Г., Шпаковский В. В., Белов Н. Л., Шейко А. И.,
Олейник А. К., Пономаренко И. В.

КОНТИНУАЛЬНАЯ И ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Монография

Харьков 2015

УДК 539.3: 621.793: 621.787: 669: 620.17

ББК 34.4

К 65

Рецензенты:

Ляшенко Б. А., д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии
Украины в области науки и техники, Институт проблем прочности
им. Г. С. Писаренко НАН Украины

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии
Украины в области науки и техники, НТУ "ХПИ"

Подрыгало М. А., д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии
Украины в области науки и техники, ХНАДУ

Публикуется по решению ученого совета Национального технического
университета "Харьковский политехнический институт",
протокол № 2 от 24.02.2015

В роботі описана розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення високої надійності, довговічності, технічних і тактико-технічних характеристик форсованих двигунів, військової і цивільної техніки за рахунок дискретного та інших способів зміцнення, а також впровадження у виробництво нових енергозберігаючих і економічних способів збільшення їх конструктивної міцності.

К 65 Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров, В.В. Шпаковский, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, А.К. Олейник, И. В. Пономаренко. – Х. : «Щедра садиба плюс», 2015. – 259 с. – На рус. языке

В работе описана разработка научно-технических основ повышения ресурса и обеспечения высокой надежности, долговечности, технических и тактико-технических характеристик форсированных двигателей, военной и гражданской техники за счет дискретного и других способов упрочнения, а также внедрение в производство новых энергосберегающих и экономичных способов увеличения их конструктивной прочности.

Ил. 203. Табл. 44.

ISBN ISBN 978-617-7225-53-8

ББК 34.4

© Ткачук Н.А., Дьяченко С.С.,
Посвятенко Э.К., Кравченко С.А.,
Гончаров В.Г., Шпаковский В.В.,
Белов Н. Л., Шейко А. И.,
Олейник А.К., Пономаренко И.В.
© НТУ "ХПИ", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Список обозначений и сокращений	7
Введение	9
Раздел 1. Обзор методов инженерии поверхности деталей машин	11
1.1. Анализ влияния ресурса коленчатого вала на срок службы двигателей транспортной техники	11
1.2. Особенности износа поверхностей шеек коленчатых валов двигателей транспортных средств	15
1.3. Материалы для коленчатых валов транспортных средств и способы их упрочнения	20
1.4. Основные способы ремонта коленчатых валов двигателей	28
1.5. Применение дискретного упрочнения для поверхностей деталей	32
1.6. Инженерия поверхности деталей машин как базовое направление повышения износостойкости и выбора способа упрочнения поверхностей тяжелонагруженных изделий	34
Литература к разделу 1	40
Раздел 2. Научные основы проектно-технологического обеспечения технических характеристик и методов упрочнения тяжелонагруженных элементов машин	41
2.1. Теоретико-множественный подход к генерированию моделей физико-механических процессов и состояний сложных и сверхсложных механических систем	42
2.2. Разработка математического аппарата для исследования тяжелонагруженных элементов машин	50
2.3. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания	54
Литература к разделу 2	65
Раздел 3. Дискретное электроискровое упрочнение поверхностей тяжелонагруженных элементов машин	68
3.1. Физико-химическая сущность процесса электроискровой обработки	68

3.2.	Факторы, влияющие на процесс электроискровой обработки, получаемую структуру и свойства	70
3.3.	Научно-техническое обоснование нового способа дискретного упрочнения	72
3.4.	Материалы, оборудование, технологическая оснастка и электроды для дискретного электроискрового упрочнения коленчатых валов	74
3.5.	Методика экспериментальных исследований	75
3.6.	Структура в зоне дискретного упрочнения	77
3.7.	Распределение элементов в области разряда	78
3.8.	Влияние силы тока разряда на глубину, микротвердость зоны дискретного упрочнения и образование в ней дефектов	84
3.9.	Влияние дискретности при дискретном электроискровом упрочнении на коэффициент трения	86
3.10.	Износостойкость чугуна после разной обработки	88
3.11.	Износостойкость стали 42ХМФА после разной обработки	90
3.12.	Влияние дискретного электроискрового упрочнения на сопротивление усталости чугунных образцов	92
	Литература к разделу 3	94
Раздел 4. Анализ напряженно-деформированного состояния упрочненных элементов машин		95
	Литература к разделу 4	101
Раздел 5. Отечественный и зарубежный опыт повышения ресурса и топливной экономичности ДВС путем применения износостойких и теплостойких материалов		102
5.1.	Применение керамики для теплоизоляции камеры сгорания ДВС	102
5.2.	Влияние теплоизоляции на температуру поршня	106
5.3.	Влияние теплоизоляции на расход топлива	109
5.4.	Влияние угла опережения подачи топлива на его расход	115
5.5.	Влияние теплостойких и износостойких покрытий деталей цилиндро-поршневой группы на показатели рабочего процесса двигателей	116
5.6.	Анализ влияния износостойких и теплостойких покрытий деталей цилиндро-поршневой группы на уменьшение механических потерь	125

5.7.	Механизм влияния гальвано-плазменного покрытия поршней на показатели рабочего процесса автотракторных дизелей	126
5.8.	Применение технологии микродугового оксидирования для получения износостойкого и теплостойкого керамического слоя на деталях цилиндро-поршневой группы	130
5.9.	Технологический процесс гальвано-плазменной обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов	131
5.10.	Оборудование для гальвано-плазменной обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов	133
5.11.	Исследование корундовой поверхности	135
	Литература к разделу 5	138
Раздел 6. Комбинированные технологии повышения износостойкости тяжелонагруженных пар трения		142
	Литература к разделу 6	151
Раздел 7. Технологическое обеспечение свойств поверхности деталей машин		153
7.1.	Развитие принципов исследования процессов холодного пластического деформирования применительно к машиностроению	153
7.2.	Применение холодного пластического деформирования в процессах со сложным нагружением и немонотонным деформированием	160
7.3.	Бесстружечная обработка фасонных отверстий деталей машин	165
7.4.	Интенсификация безводородного азотирования в тлеющем разряде холодным пластическим деформированием	171
7.5.	Холодная пластическая деформация как фактор повышения обрабатываемости пластических материалов	176
7.6.	К расчету инструмента для обработки отверстий гильз гидrocиллиндров гидросхем современных машин	183
	Литература к разделу 7	188
Раздел 8. Повышение конструктивной прочности изделий ионно-плазменной обработкой с созданием поверхностной наноструктуры		194
8.1.	Методика исследований	195
8.2.	Результаты исследований	197
8.3.	Анализ результатов	201
8.4.	Топография поверхности после ионно-плазменной обработки	208

8.5.	Физические явления, обуславливающие повышение конструктивной прочности изделий при ионной бомбардировке	210
8.6.	Производственные испытания	211
	Литература к разделу 8	214
Раздел 9. Практическая реализация технологий упрочнения при изготовлении и ремонте		217
9.1.	Дискретное электроискровое упрочнение деталей двигателей на примерах моделей КамАЗ-740 и типа Д80, 5Д49	217
9.2.	Оценка экономического эффекта от внедрения в производство дискретного электроискрового упрочнения коленчатых валов	218
9.3.	Улучшение характеристик и ресурса ДВС применением технологии модификации поверхностных слоев деталей из алюминиевых сплавов	220
9.4.	Оценка влияния теплоизоляции камеры сгорания на рабочий процесс, расход топлива и ресурс ДВС	252
9.5.	Внедрение разработок на объектах военной и гражданской техники	255
	Литература к разделу 9	256
Заключение		258

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Раздел 1

ДВС – двигатель внутреннего сгорания
КШМ – кривошипно-шатунный механизм
ЦПГ – цилиндро-поршневая группа
КПД – коэффициент полезного действия
ХТО – химико-термическая обработка
ППД – поверхностная пластическая деформация

Раздел 2

НДС – напряженно-деформированное состояние;
М – математическая модель
N – численная модель
Е – экспериментальная модель
КЭМ – конечно-элементная модель

Раздел 3

ЭИО – электроискровая обработка
ДЭУ – дискретное электроискровое упрочнение
ТВЧ – токи высокой частоты

Раздел 4

ВЭМ – высоконагруженные элементы машин
ДЭУ – дискретное электроискровое упрочнение
НДС – напряженно-деформированное состояние
ДЗУ – дискретная зона упрочнения
КЭМ – конечно-элементная модель

Раздел 5

ГПО – гальвано-плазменная обработка
ДВС – двигатель внутреннего сгорания
КПД – коэффициент полезного действия
КС – камера сгорания
МДО – микродуговое оксидирование

Раздел 6

ДВС – двигатель внутреннего сгорания
КПД – коэффициент полезного действия
ТВЧ – токи высокой частоты
ДУЗ – дискретно упрочненная зона

Раздел 7

ХПД – холодное пластическое деформирование
НДС – напряженно-деформированное состояние
ДВС – двигатель внутреннего сгорания
ДП – деформирующее протягивание
ДЭ – деформируемые элементы
ОП – обработанные поверхности
ХДУ – холодное деформационное упрочнение
ВВД – волна внеконтактной деформации
КИМ – коэффициент использования металла

Раздел 8

ИПО – ионно-плазменная обработка
ИБ – ионная бомбардировка
АСМ – атомно-силовой микроскоп

Раздел 9

ТР – текущий ремонт
ДВС – двигатель внутреннего сгорания
ЦПГ – цилиндро-поршневая группа
КПД – коэффициент полезного действия
ТР-2 – текущий ремонт номер 2
ТР-3 – текущий ремонт номер 3
ВМТ – верхняя мертвая точка
КС – камера сгорания
ТЧ – твердые частицы
ОГ – отработавшие газы
СКО – среднеквадратичные отклонения
МДО – микродуговое оксидирование

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания высоконадежной гражданской и военной техники и обеспечения ее высоких технических и тактико-технических характеристик при использовании наименее затратных, энергоэффективных и экологически безопасных методов производства и обработки, безусловно, является очень важной для Украины и других стран. Как известно, значительная часть машиностроительных конструкций работает в тяжелых условиях одновременного действия многих факторов – высоких и неоднородно распределенных напряжений, циклических нагрузок, вызывающих усталость материала изделия; важны также и такие факторы как повышенные и высокие температуры, наличие трения, результатом которого является износ контактирующих поверхностей, воздействие агрессивной среды и тому подобное. В связи с этим при их изготовлении необходим поиск таких технологий, которые позволили бы удовлетворить если не все, то по крайней мере важнейшие требования к характеристикам материала. В частности, остро стоит вопрос повышения ресурса транспортной техники, который в первую очередь упирается в увеличение долговечности двигателей и других определяющих элементов их конструкций.

Эта проблема имеет большое значение вообще для народного хозяйства, в том числе для транспортных средств. Например, в настоящее время на железных дорогах Украины эксплуатируется около 2500 единиц тепловозов. Значительная часть из них исчерпала нормативный срок эксплуатации. Продлить возможность их эксплуатации можно при выполнении капитального ремонта с использованием новых технологий, обеспечивающих повышение триботехнических и механических характеристик деталей, узлов и агрегатов, а также максимального остаточного ресурса тяжело нагруженных деталей двигателей. Те же аргументы справедливы и для военной техники.

По статистике двигатели транспортных средств имеют достаточно ограниченный срок службы, что приводит к огромным убыткам. Одной из основных причин их недостаточной долговечности является, например, изнашивание шеек коленчатых валов. Материальные потери вследствие трения и износа в машиностроении развитых государств достигают 4-5 % национального дохода. Согласно известным данным, сопротивление трению поглощает во всем мире 30–40 % энергии, вырабатываемой в течение года. Расходы на ремонт и техническое обслуживание машин иногда в несколько

раз превышают их стоимость. Двигатели транспортной техники за весь срок службы ремонтируют до 5 раз. Ресурс двигателя после ремонта по сравнению с ресурсом нового двигателя составляет 30–50%, хотя по техническим условиям должен быть не ниже 80 %. Как показывает практика, около 75 % деталей после разборки агрегатов, поступивших в капитальный ремонт, имеют большой остаточный ресурс и могут быть использованы повторно после восстановления с затратами, которые не превышают 40-60 % стоимости новых деталей.

Итак, проблема повышения износостойкости деталей транспортных средств и трибосистем в целом является актуальной и требует всестороннего подхода и изучения. При этом технологический процесс изготовления, ремонта и восстановления детали (агрегата) предполагает не только достижение необходимых геометрических параметров, но и, главным образом, устранение или замедление разрушительных процессов, которые естественно протекают на поверхности детали. Поэтому при достаточно большом количестве способов актуальной проблемой до сих пор является поиск новых эффективных технологий, обеспечивающих повышение ресурса рабочих поверхностей.

Решение этой проблемы позволит значительно повысить надежность, технические и тактико-технические характеристики форсированных двигателей, военной и гражданской техники и вообще обеспечить конкурентоспособность машиностроительной продукции Украины на мировом рынке.

В работе описана разработка научно-технических основ повышения ресурса и обеспечения высокой надежности, долговечности, технических и тактико-технических характеристик форсированных двигателей, деталей и узлов военной и гражданской техники за счет дискретного и других способов упрочнения, а также внедрения в производство новых энергосберегающих и экономичных способов увеличения конструктивной прочности тяжело нагруженных элементов машин.

При этом на основе теоретико-множественного подхода предложены новые *концепция, методы и модели* для повышения ресурса двигателей, объектов военной и гражданской техники на базе технологии дискретного, континуального, дискретно-континуального упрочнения и других методов модификации поверхностей элементов конструкций.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В разделе описан анализ состояния технологий упрочнения поверхностных слоев деталей машин, находящихся в условиях подвижного контактного сопряжения, их преимуществ и недостатков. В качестве иллюстрационных объектов приняты в первую очередь, наиболее нагруженные и ответственные детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (коленчатые валы, вкладыши подшипников скольжения, поршни, гильзы). Эти детали в основном лимитируют ресурс, работоспособность и экономичность работы двигателей внутреннего сгорания. В то же время они являются яркими примерами тяжелонагруженных трущихся деталей машин, и поэтому все обнаруженные проблемы, обстоятельства, явления можно отнести ко всему классу таких деталей и технологий их упрочнения.

1.1. Анализ влияния ресурса коленчатого вала на срок службы двигателей транспортной техники

Отказы деталей транспортной техники при нормальных условиях эксплуатации происходят вследствие различных видов износа, коррозии, эрозии, кавитации, старения материала и др.

Современное состояние теории рабочих процессов машин, наличие совершенной экспериментальной техники для определения рабочих нагрузок и высокий уровень развития прикладной теории упругости при существующих представлениях о физико-механических свойствах материалов позволяют обеспечить достаточную прочность деталей машин в нормальных условиях эксплуатации. В то же время наиболее распространенной причиной отказов транспортных средств и их выхода из строя является не поломка, а износ и повреждения рабочих поверхностей. Так, практика эксплуатации машин и опыт свидетельствуют о том, что в 80 случаях из 100 они выходят из строя из-за отказов узлов трения, связанных с износом.

Основные технико-экономические показатели двигателей транспортных средств, эксплуатируемых в Украине, как правило, находятся на уровне большинства зарубежных аналогов. Ресурс до первого капитального ремонта, установленный заводом-изготовителем, должен составлять 8000-9000 часов. То есть при среднегодовой наработке 1000 часов двигатель должен работать без капитального ремонта 8-9 лет. Этот срок практически ра-

вен амортизационному сроку службы транспортной техники, то есть нормативным по надежности. Однако, в реальных условиях эксплуатации мощностно-экономические показатели двигателей значительно хуже. В частности, фактические средние наработки до ремонта для двигателей КамАЗ-740 составляют 110-160 тыс. км, а между ремонтами – 50-70 тыс. км, хотя ГОСТ 23465-79 устанавливает их ресурс до капитального ремонта не менее 350 тыс. км для двигателей с рабочим объемом до 11 л и 200 тыс. км – для двигателей сельскохозяйственного назначения такого же объема. Таким образом, наработка двигателей до ремонта существенно ниже нормативной.

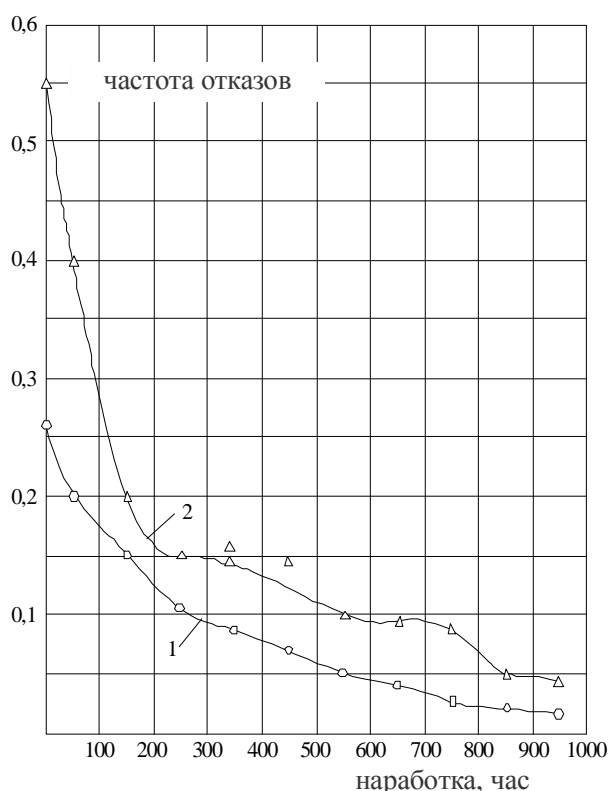


Рис. 1.1 – Распределение отказов двигателей в начальный период эксплуатации: 1 – новый ДВС; 2 – отремонтированный ДВС

ного производства; неэффективная технология ремонта деталей; низкое качество обработки поверхностей трения; отсутствие современных технологий и оборудования, обеспечивающих высокие физико-механические свойства материала отремонтированных деталей; недостаточная специализация производства на ремонтных предприятиях по сравнению с ее уровнем на заводах-изготовителях серийной продукции.

В целом, современное ремонтное производство по уровню организации и технического оснащения еще не полностью отвечает требованиям обеспечения высоких показателей качества. Так, показатель безотказности и ресурса капитально отремонтированных двигателей составляет 50-60% от

Характер распределения отказов новых и отремонтированных двигателей с ростом наработки показывает, что наибольшая их интенсивность наблюдается в начальный период эксплуатации. Увеличение отказов отмечено при наработках 100–300 ч., а затем наблюдается снижение их количества (рис. 1.1).

Для новых двигателей это объясняется несовершенством технологии их изготовления, в частности неправильным выбором упрочняющих операций обработки, а также нарушением условий приработки деталей.

Причинами недостаточного ресурса двигателей после ремонта являются: низкая культура ремонт-

соответствующих значений новых. При этом наиболее частым ресурсным отказом ДВС является выход из строя в результате износа и последующего разрушения деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ), т.е. пары трения "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения", и цилиндро-поршневой группы (ЦПГ). Обобщенные данные приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Количественная оценка ресурсных отказов двигателей

Отказ	Количество, %				
	СМД-62	ЯМЗ - 238НБ	ЯМЗ - 240Б	Д-240	КамАЗ - 740
Выход из строя деталей КШМ	67	55	45	40	56
Износ деталей ЦПГ	14	20	35	44	24
Обрыв поршня	14	15	15	10	8
Обрыв шатуна и его болтов	1	10	5	6	9
Обрыв болтов крепления маховика	-	-	-	-	3

Анализ динамики изменения зазоров в трибосистемах двигателей транспортных средств показывает, что интенсивный характер увеличения зазора, наряду с деталями ЦПГ, имеют и детали КШМ, то есть шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения. Зависимости зазора в КШМ от наработки представлены на рис. 1.2.

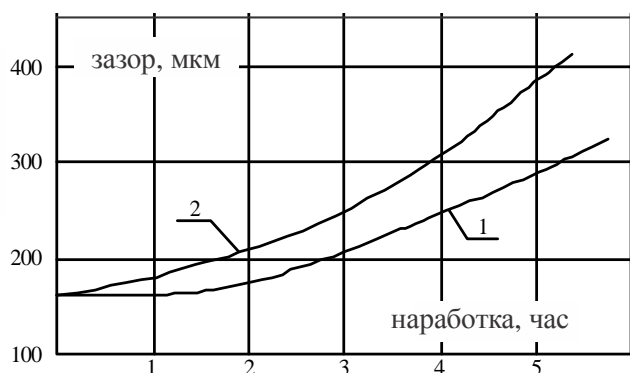


Рис. 1.2 – Динамика изменения зазоров в сопряжении "вкладыш – шейка коленчатого вала" нового (1) и отремонтированного (2) двигателя

чатого вала – вкладыш подшипника скольжения. Зависимости зазора в КШМ от наработки представлены на рис. 1.2.

Сравнение скорости износа сопряжений показывает, что после ремонта она в 1,5–2,0 раза выше, чем у новых двигателей.

Основной причиной преждевременного выхода из строя деталей двигателей после капитального ремонта, в частности, трибосистемы "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения", является технология и качество упрочнения коренных и шатунных шеек коленчатых валов. Статистические данные величины износа коренных и шатунных шеек для грузовых и легковых автомобилей представлены на рис. 1.3. Эти данные свидетельствуют о том, что износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала как для легковых, так и для грузовых автомобилей с каждым ремонтным размером растет, и, как следствие, двигатель выходит из строя значительно раньше установленного времени. Если не учитывать качество механической (финишной) обработки

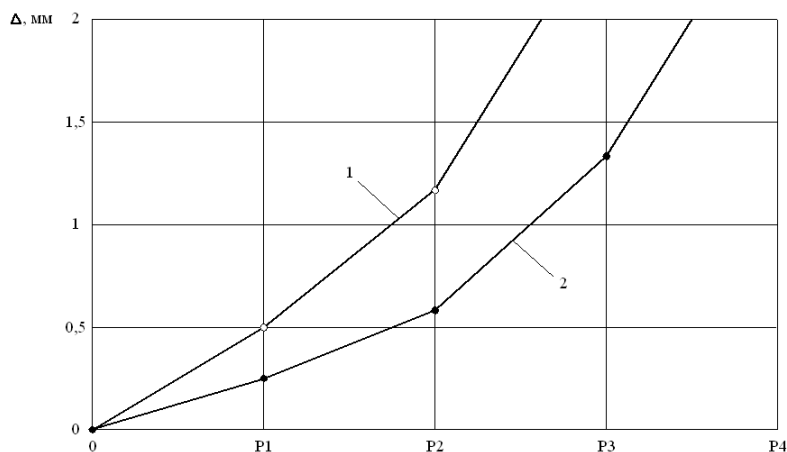


Рис. 1.3 – Зависимость износа шеек коленчатого вала от количества ремонта: 1 – грузовые автомобили; 2 – легковые автомобили; P – номер ремонтного размера на деталь

детали после ее восстановления, погрешности сборки и считать, что автомобиль эксплуатируется в нормальных условиях, то причиной этого является неэффективность технологии упрочнения шеек коленчатого вала.

Подтверждением этого предположения

являются коленчатые валы двигателей КамАЗ-740 и 5Д49. Согласно рабочим чертежам коленчатые валы этих двигателей (№ 740.1005020 № 2-9ДГ.8.01-1) изготавливаются соответственно из сталей 42ХМФА и 38ХНЗМА и после механической обработки упрочняются азотированием на глубину $h = 0,25-0,4$ мм. При этом, в соответствии с требованиями на установленные ремонтные размеры для этих деталей, разница между номинальным и последним ремонтным размером (КамАЗ-740 – 4 pp., 5Д49 – 12 pp.) составляет 1-3 мм, что значительно превышает глубину упрочненного азотированного слоя. Однако, согласно принятой технологии ремонта коленчатых валов, не предполагается после каждого ремонтного размера шеек выполнять операцию упрочнения азотированием. В результате значительное количество деталей, подлежащих восстановлению, не ремонтируются, что приводит к огромным экономическим потерям в области машиностроения.

Наряду с проблемой повышения ресурса пары "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения", большое значение имеет уменьшение потерь мощности на преодоление трения в самом двигателе. При эксплуатации двигателя часть мощности расходуется на внутренние механические процессы, в частности, на преодоление трения во всех трибосистемах, одной из которых является пара "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения". В этом сопряжении теряется около 16–19 % мощности.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что проблема повышения износостойкости коренных и шатунных шеек коленчатых валов, а следовательно, в целом ресурс работы пары трения "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения", является актуальной и ключевой в настоящее время. При этом, рассматривая проблему выбора способа упрочне-

ния поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатых валов, необходимо решить следующие задачи:

- не допустить разупрочнения основного металла при конечной упрочняющей обработке шеек вала как на стадии изготовления, так и на стадии ремонта;
- повысить износостойкость коренных и шатунных шеек коленчатого вала;
- снизить коэффициент трения в трибосистеме "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения";
- уменьшить изнашиваемость коренных и шатунных шеек коленчатого вала по отношению к вкладышам подшипников скольжения.

1.2. Особенности износа поверхностей шеек коленчатых валов двигателей транспортных средств

Повышение технико-экономических показателей силовых агрегатов (двигателей) на современном этапе развития техники характеризуется интенсификацией их эксплуатационных режимов. Это приводит к повышению рабочих температур, давления и нагрузок на конструктивные элементы и детали.

Коленчатый вал является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее напряженной деталью двигателя, работающего в широком диапазоне нагрузок и скоростей вращения. Основной и постоянно действующей причиной изменения технического состояния коленчатого вала и трибосистемы "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения", является износ коренных и шатунных шеек. Износ шеек коленчатых валов увеличивает зазор между шейкой и вкладышем подшипника качения. Это в свою очередь приводит к снижению давления масла и, с увеличением зазора, – к росту динамических нагрузок, которые постепенно приобретают ударный характер. В результате интенсифицируется процесс снижения тягового усилия, допустимой скорости движения, КПД и других технических характеристик, а следовательно, существенно повышается износ поршневых пальцев, поршня, верхних головок шатуна и т. п.

Неравномерный износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала по его длине приводит к образованию завышенной ступенчатости между смежными шейками, что вызывает увеличение изгибающих нагрузок на коленчатый вал и может быть причиной его разрушения. При этом износ коренных шеек или вкладышей подшипника скольжения в пределах 0,05–0,08 мм уже опасен, поскольку может привести к поломке коленчатого вала.

Изучение характера и причин разрушения коленчатых валов показало, что почти во всех случаях они связаны с интенсивным износом шеек, и лишь небольшой процент от общего количества отказов обусловлен дефектами ма-

териала детали.

Это в полной мере подтверждает выводы большинства ученых о том, что именно разрушение поверхностей деталей машин при контактном взаимодействии, как правило, предшествует разрушению основы. Поэтому в общей проблеме надежности и долговечности машин принято различать "объемную прочность" и "прочность поверхностного слоя". Подавляющее большинство отказов (до 80 %) происходят в результате поверхностного разрушения и, прежде всего, износа.

В реальных условиях эксплуатации, кроме износа, происходит еще одно вредное явление – развитие усталости металла, причем имеет место как усталость материала в объеме изделия, так и в поверхностном слое (контактная усталость). Как правило, износ и усталость развиваются совместно и взаимосвязано. Это приводит к появлению комплексного износоусталостного повреждения узлов силовых систем. В таблице 1.2 приведены примеры характерных силовых систем и указаны доминирующие процессы их повреждения в эксплуатационных условиях.

Таблица 1.2 – Типичные силовые системы "твердое тело – твердое тело" и характер их комплексного повреждения в условиях эксплуатации

Тип силовой системы	Ведущие процессы повреждения в условиях эксплуатации	Комплексное повреждение
Шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения	износ, усталость	фрикционно-механическая (контактная) усталость
Колесо – железнодорожный рельс	усталость, износ, отслоение	контактно-механическая усталость
Шлицевой вал – муфта	усталость, износ при фреттинг-коррозии, изнашиваемость при фреттинге	фреттинг-усталость

Таким образом, долговечность и ресурс работы коленчатых валов определяются двумя параметрами: усталостной прочностью и износостойкостью.

Если проблема повышения усталостной прочности коленчатого вала и в общем всех элементов трибосистем двигателя решается преимущественно на стадии его проектирования, то износостойкость деталей и пар трения зависит от многих факторов, начиная с конструкции коленчатого вала, методов его упрочнения и заканчивая режимами работы двигателя, качества применяемых автоэксплуатационных материалов и внешних условий работы (рис. 1.4).

Анализ влияния различных факторов в общем процессе износа деталей двигателя является сложной задачей. Износ, возникающий при работе

трибосистем, характеризуется удалением материала с контактирующих поверхностей в результате механических и химических процессов. В настоящее время достаточно хорошо изучены отдельные виды и законы износа, однако сформулировать и обобщить все многообразие явлений, которые происходят в поверхностном слое, невозможно.

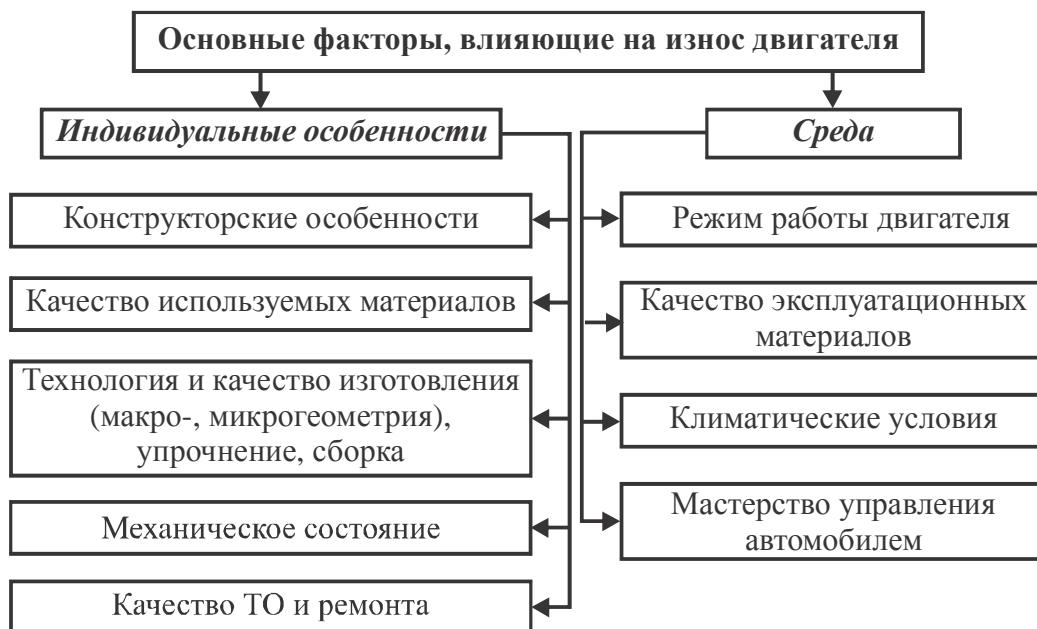


Рис. 1.4 – Факторы, влияющие на интенсивность износа трибосистем двигателя

Износостойкость необходимо рассматривать как характеристику сложной трибологической системы, поскольку она не является такой же характеристикой материала, как, например, временное сопротивление.

При контакте двух связанных поверхностей и их относительном перемещении в поверхностных слоях возникают механические и молекулярные взаимодействия, которые, в конце концов, и приводят к разрушению микрообъемов поверхностей, то есть к их износу.

Ведущим процессом изнашивания трибосистемы "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения" является механический износ, в который, согласно ДСТУ 2823-94, входят абразивная и усталостная составляющие. Сопутствующими видами износа является адгезионный (износ при заедании), износ при фреттинге, механико-химический, одним из видов которого является износ при фреттинг-коррозии. В зависимости от условий работы двигателя при определенных условиях каждый из перечисленных видов может стать ведущим в процессе разрушения. На рис. 1.5 (см. цветн. вклейку) показана поверхность шейки коленчатого вала двигателя 5Д49, на которой видны кольцевые риски, характеризующие абразивный износ детали.

Абразивные частицы попадают в рабочую зону пары трения из воздуха,

вместе с горючими и смазочными материалами, а также при сборке узла.

Загрязненные смазочные материалы существенно влияют на интенсивность процесса изнашивания шатунных и коренных шеек коленчатых валов, в результате чего износ может происходить даже при жидкостном трении.

Как было раньше отмечено, коленчатый вал является наиболее нагруженной деталью двигателя, воспринимает периодические нагрузки от сил давления газов в цилиндрах, сил инерции масс, движущихся возвратно-поступательно, и их моментов. В течение каждого рабочего цикла (720° для четырех- и 360° для двухтактного двигателя), силы, действующие на коленчатый вал, непрерывно изменяются по величине и направлению. Это в совокупности приводит к тому, что трибосистема "шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения" двигателей работает в широком диапазоне динамических нагрузок и скоростей трения.

В результате таких условий работы детали на поверхности коренных и шатунных шеек коленчатых валов происходят усталостные процессы.

Под термином «усталость» обычно понимают особый тип разрушения, вызываемого повторно действующими циклами, амплитудное значение которых не превышает предела упругости материала. Оно является результатом постепенного накопления повреждений на поверхности, которые приводят к образованию пиков напряжений и в конечном итоге – к отслоению частиц металла или его оксидных пленок при многократной нагрузке, изменению геометрических параметров изделий и выходу их из строя.

Как уже отмечалось, усталостное изнашивание, наряду с абразивным, является одним из наиболее распространенных механизмов разрушения поверхностей деталей силовых систем. Исследование поля упругопластических напряжений в подповерхностных зонах контактных поверхностей и учет взаимодействия дислокаций между собой и с поверхностью позволило ввести термин "изнашивание отслоением". Образование усталостных микротрещин происходит в местах скопления дислокаций на поверхности изделия или на определенном расстоянии от поверхности, в зависимости от соотношения модулей сдвига самого металла и его поверхностного слоя. Растягивающие напряжения раскрывают микротрещины, и в них затекает смазочное вещество. При изменении растягивающих напряжений на сжимающие трещины закрываются, а смазочное вещество создает высокое давление, под влиянием которого происходит дальнейшее развитие трещин. Соединяясь, они образуют сетку усталостных трещин, что приводит к разрушению поверхности.

Образование усталостных трещин наблюдается как в условиях ограничен-

ной, так и интенсивной смазки (рис. 1.6, 1.7, см. цветн. вклейку).

При этом исключительно важную роль играет дискретность (локальность) поверхностных деформаций. Это достоверно подтверждается природой микронеродного деформированного состояния металлов как в упругой, так и в пластической зонах. Поэтому основным видом фрикционных связей материалов, возникающих при трении в сопряжении «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника скольжения», является упругопластическая деформация как результат износа микрорельефов контактирующих поверхностей. При трении двух поверхностей зоны контакта постоянно изменяются, а отдельные микронеровности подвергаются многократной нагрузке, в результате чего и возникают условия для усталостного разрушения поверхностного слоя.

При любом виде износа работа пары трения состоит из трех стадий: приработки, установившегося износа, в течение которого его скорость постоянна, и катастрофического износа.

Во время приработки трущиеся поверхности интенсивно изнашиваются, увеличивается реальная площадь их контакта. Продолжительность этого периода обусловлена качеством поверхности и режимом работы и, как правило, равна 1,5-2 % ресурса узла трения. На этой стадии важное значение имеет исходная шероховатость поверхностей трения. Чем больше высота микронеровностей, тем меньше площадь фактического контакта сопряженных тел и выше удельное давление в пятне контакта. Это может привести к повышению температуры в месте контакта, разупрочнению материала и ускоренному износу. Оптимальная шероховатость, то есть шероховатость, которая вызывает минимальный износ на стадии приработки, зависит от условий работы детали. Поэтому для конкретной пары в зависимости от условий эксплуатации, как правило, экспериментально устанавливается финишная оптимальная шероховатость, обеспечивающая приработку с наименьшим износом за самое короткое время.

После приработки с переходом к стадии устойчивого износа устанавливается равновесная шероховатость, которая сохраняется при дальнейшей эксплуатации неизменной. При этом, если исходная шероховатость превышает оптимальную, происходит ее уменьшение, если же шероховатость меньше оптимальной, то со временем она увеличивается.

Именно вторая стадия характеризует долговечность пары, работающей в условиях трения. В этот период устанавливается динамическое равновесие между процессами упрочнения и разупрочнения поверхностных слоев, в которых наблюдается формирование новых структур. Поверхностный рельеф, который при этом образуется, и характер новых структур обуславливают износостойкость. Они, в свою очередь, зависят не только от материалов пары и их исходной структуры, но и от процессов, которые проис-

ходят на стадии приработки. Поэтому начальный период износа является очень ответственным, и от него во многом зависит износостойкость реальной пары трения.

Обеспечение высокой износостойкости – это прежде всего уменьшение износа на стадии приработки, замедление этого процесса на стадии устойчивой эксплуатации, то есть удлинение второй стадии, и за счет повышения долговечности.

Эта задача решается рациональным выбором материалов деталей, работающих в контакте (пар трения), и способа их обработки. При этом надо учитывать, что износостойкость зависит не только от свойств поверхностного слоя изделия, но также и от условий эксплуатации (удельного давления, температуры, скорости движения, смазки и т.д.). Не существует универсального износостойкого материала. Материал, устойчивый к износу в одних условиях, может катастрофически быстро выходить из строя при изменении условий эксплуатации.

Очень большую роль в обеспечении необходимой износостойкости играет материал вкладыша. Для пары «коленчатый вал – вкладыш» используют антифрикционные оловянно-фосфорные, алюминиевые, никель-кремниевые бронзы. Однако в машинах большой мощности в тяжело нагруженных парах трения применяемая номенклатура материалов сведена к минимуму, поскольку не все материалы удовлетворяют требованиям высоких удельных нагрузок и скоростей скольжения.

1.3. Материалы для коленчатых валов транспортных средств и способы их упрочнения

Как уже отмечалось, коленчатый вал двигателя является одной из конструктивно самых сложных деталей силовых установок транспортных средств. В условиях действия на коленчатый вал высоких циклических и ударных нагрузок материал, из которого он изготавливается, должен обладать одновременно высокой статической и усталостной прочностью, достаточной пластичностью, высокой ударной вязкостью и вязкостью разрушения.

В настоящее время основными материалами, которые используются для изготовления коленчатых валов в зависимости от типа двигателя, являются углеродистые и легированные стали и различного вида чугуны (рис. 1.8).

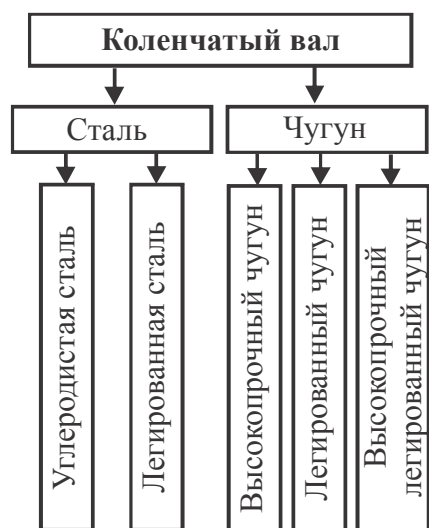


Рис. 1.8 – Основные виды материалов коленчатых валов

Материал вала выбирают в зависимости от его нагруженности и размеров. Для легконагруженных валов, от которых требуются свойства на уровне $\sigma_b \geq 370$ МПа, $\psi \geq 20$ %, $KCU \geq 40$ Дж/см², обычно используют среднеуглеродистые нелегированные стали. Такие свойства обеспечиваются пластинчатыми ферритно-цементитными структурами, получаемых нормализацией, поэтому диаметр шейки вала значения не имеет. Тяжелонагруженные коленчатые валы должны иметь $\sigma_b \geq 550$ МПа, $\psi \geq 50$ %, $KCU \geq 100$ Дж/см². Такой уровень свойств может быть достигнут при структурах зернистого типа, получаемых путем улучшения. В этом случае необходимо обеспечить сквозную прокаливаемость, и диаметр шейки играет определяющую роль, поскольку критический диаметр стали должен быть больше диаметра шейки. Чем больше диаметр, тем выше содержание легирующих элементов в выбранной стали. После объемной термической обработки (закалка с высоким отпуском) шейки подвергают поверхностной упрочняющей обработке.

Для коленчатых валов серийных тракторных двигателей, как правило, используют сталь 45. Предварительная термическая обработка таких валов заключается в улучшении или нормализации. Поскольку эта сталь имеет небольшую прокаливаемость (10-12 мм), после заковки сердцевина часто сохраняет ферритно-цементитную структуру пластинчатого типа. В таком случае проведение заковки становится нерациональным и заменяется нормализацией. К тому же из-за незначительной прокаливаемости эту сталь необходимо закалять в воде, что вызывает возникновение больших закалочных напряжений и приводит к деформации валов. Практический опыт свидетельствует, что нормализованные коленчатые валы двигателя Д54 имеют более высокие свойства, в частности, повышенную усталостную прочность, чем улучшенные. Для некоторых тракторных двигателей коленчатые валы изготавливают из стали 45Г2, имеющей большую прокаливаемость, чем сталь 45.

В качестве материалов для изготовления коленчатых валов более нагруженных двигателей транспортных средств (автомобильных, тепловозных и судовых) широкое распространение получили легированные стали. Так, при изготовлении коленчатых валов двигателей типа ЯМЗ, КамАЗ, типа Д49 и других используют стали 60ХФА, 50Г, 42ХМФА, 18Х2Н4ВА, 38ХН3ВА, 38ХН3МА. Выбор марки стали в каждом отдельном случае обусловлен типом двигателя и его нагруженностью в процессе эксплуатации. В зависимости от стали избирается и метод дальнейшего упрочнения корен-

ных и шатунных шеек коленчатого вала.

При изготовлении коленчатых валов для тракторных двигателей за рубежом применяют, в основном, аналоги легированным среднеуглеродистым сталям: в Англии, Италии, Франции – 40ХМ, 40ХГНМ; в Германии – 45Х, 40ХГ; в США – 50Г.

В последние годы широкое распространение в двигателях транспортных средств получили также коленчатые валы, изготовленные из чугуна. Литые полые коленчатые валы из чугуна дешевле стальных. Для коленчатых валов используется серый легированный чугун, но чаще всего высокопрочный чугун с глобулярным (шаровидным) графитом (ДСТУ 3925-99) как нелегированный (ВЧ60-2), так и легированный (ТУ Д70.05.Дт: 1978). В основу этих марок чугуна был положен серый чугун марки СЧ25 (ГОСТ 1412-87) с добавлением небольшого количества магния (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Химический состав чугуна для изготовления коленчатых валов

Чугун	Химический состав, % мас								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Mg
Серый легированный	2,15-2,45	2,2-2,5	1,1-1,3	0,045	0,045	0,4-0,6	1,01-1,2	0,9-1,1	-
Высокопрочный с глобулярным графитом	3,3-3,5	2,3-3,5	0,6-0,7	0,09	0,015	-	-	-	0,05-0,1
Высокопрочный легированный с глобулярным графитом	3,4-3,9	1,9-2,5	0,8-1,25	0,05	≤0,02	≤0,1	0,5-1,0	0,2-0,5	0,05-0,1

Высокопрочный чугун имеет меньшую чувствительность к концентраторам напряжений, высокие антифрикционные свойства, высокую износостойкость и циклическую вязкость.

Создание модифицированных чугунов позволяет во многих случаях отказываться от применения стальных кованных или штампованных коленчатых валов. Особенностью этих чугунов является сравнительно высокий предел прочности при растяжении (390-510 МПа). После термической обработки этот показатель достигает 540-690 МПа при сохранении определенной пластичности, причем предел выносливости чугунных валов обычно выше, чем стальных. Наиболее положительным фактором, способствующим применению чугуна для изготовления коленчатых валов, является возможность придать валу при его изготовлении (отливке) рациональную конструкцию для обеспечения равнопрочности во всех его сечениях.

Однако, большое разнообразие материалов, использующихся для изготовления коленчатых валов двигателей, не обеспечивает преимуществ ни од-

ной из марок стали или чугуна по прочности, технологическим, эксплуатационным и экономическим показателям. Кроме того, независимо от материала, для обеспечения высокой износостойкости и необходимых триботехнических характеристик коренных и шатунных шеек валов необходимо применение дополнительных методов их поверхностного упрочнения.

Наиболее простым путем повышения износостойкости деталей машин, узлов и механизмов являются конструктивные меры. Но даже правильно сконструированные машины и оборудование не всегда оказываются надежными. Установлено, что до 60-70% отказов в работе машин возникают по вине завода-изготовителя. Как уже отмечалось, на качество деталей, их износостойкость, долговечность и надежность влияет, в первую очередь, выбор материалов пары трения «вал – вкладыш» и вид упрочняющих обработок, а также большое количество технологических факторов, таких как метод получения заготовки, вид и качество механической обработки, порядок выполнения операций и т.д.

На сегодня одним из наиболее эффективных способов повышения износостойкости деталей является их поверхностное упрочнение. Поверхностное упрочнение деталей – это отдельная область интенсивно развивающихся технологий. В настоящее время существует более 150 способов поверхностного упрочнения. Наряду с традиционными способами химико-термической и термической обработки, использование электролитических покрытий, различных видов наплавки, развиваются новые технологии упрочнения с применением источников с высокой концентрацией энергии – ионно-плазменная обработка, лазерное упрочнение, детонационное упрочнение и др.

Известные способы упрочнения можно разделить на шесть основных классов:

- 1 – образование пленок на поверхности;
- 2 – изменение химического состава поверхностного слоя;
- 3 – изменение структуры поверхностного слоя при неизменном химическом составе;
- 4 – изменение энергетического состояния поверхностного слоя;
- 5 – изменение шероховатости поверхностного слоя;
- 6 – изменение структуры во всем объеме металла.

Классы разделены на процессы, которые могут выполняться в различных условиях: в газовой или жидкой среде, в порошках или пастах, без использования или с использованием теплоты, при нормальном, повышенном или высоком

давлении; в низком, среднем или глубоком вакууме; в атмосфере водяного, водогазового или иного пара в контролируемых атмосферах экзогаза или эндогаза, в электропроводящей или диэлектрической среде, в среде с поверхностно-активными или абразивными свойствами, в магнитном, электрическом, гравитационном или термическом поле. Внешние условия характеризуют специфические особенности технологического процесса, при которых осуществляется данный метод упрочнения.

При изготовлении коленчатых валов двигателей транспортных средств (автомобилей, тракторов, железнодорожного и морского транспорта), а также многих других агрегатов и механизмов, имеющих силовые установки, в настоящее время широко используются способы упрочнения 2, 3 и 6-го классов.

Ко второму классу технологий упрочнения относятся процессы, при которых основной металл детали участвует в образовании приповерхностного слоя, но размеры детали при этом практически не меняются. Это различные виды химико-термической обработки (ХТО): цементация, нитроцементация, цианирование, азотирование, борирование, бороазотирование, силицирование, сульфидирование, диффузное хромирование, алитирование и др. ХТО применяют для повышения износостойкости за счет увеличения поверхностной твердости трущихся деталей, повышения сопротивления абразивному износу, противозадирной устойчивости и коррозионной стойкости. При некоторых методах ХТО также повышается усталостная прочность изделия.

Общим недостатком этих процессов является большая продолжительность технологического цикла, вредность производства, применение высоких температур и, как следствие, возрастание зерна ведет к охрупчиванию стали, деформации (искривлению) упрочняемых деталей, а соответственно – увеличению припусков под механическую обработку, а также высокая энергоемкость, невозможность многократного (повторного) упрочнения деталей.

Третий класс можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы, в основе которых лежит термическое упрочнение, заключающееся в действии интенсивного потока энергии на локальный участок поверхности, поглощении этого потока энергии приповерхностным слоем детали и вследствие этого – быстром разогреве участка до высоких температур. После прекращения действия потока энергии нагретый участок охлаждается вследствие теплопроводности во внутренние объемы материала, а также за счет теплоотдачи с поверхности. При этом достигается высокая скорость охлаждения (выше критической для данной марки стали или чугуна). В процессе нагрева и охлаждения происходят фазовые преобразования.

Наиболее распространенным методом обработки этого вида является поверхностная закалка. Поток энергии можно получить электрическим, электроимпульсным, лазерным, ультразвуковым и другими способами. В производстве наибольшее распространение нашли процессы индукционного и газопламенного нагрева поверхности изделий.

Недостатками этих методов являются:

- высокая стоимость и большие габариты технологического оборудования, особенно в случае лазерной обработки;
- необходимость организации мероприятий по защите персонала от рассеянного излучения;
- высокая энергоемкость;
- в некоторых случаях – снижение усталостной прочности.

Второй группой этого класса является упрочнение за счет поверхностного пластического деформирования (ППД), при котором в металле происходят структурные изменения, связанные с повышением плотности дислокаций, их взаимодействием, измельчением блоков, возникновением макро- и микронапряжений. В сталях, имеющих после термообработки в структуре остаточный аустенит, при этом может происходить его частичное преобразование в мартенсит и выделения дисперсных карбидных частиц.

Пластическая деформация может быть осуществлена обкаткой поверхности детали роликом или шариком, выглаживанием алмазным, эльборовым, твердосплавным и другим инструментами, гидроабразивной и дробеструйным наклепом, чеканкой и др. Но следует иметь в виду, что при таком способе обработки не достигаются высокие значения твердости, а, значит, детали имеют низкую износостойкость. Кроме этого, недостатками упрочнения пластической деформацией является то, что при повышении температуры в процессе эксплуатации свойства материала поверхности детали, полученные при упрочнении, частично или полностью исчезают. В некоторых случаях также регистрируется снижение пластичности.

Использование ППД является рациональным для уже упрочненных другими методами деталей в качестве окончательной обработки, которая в большинстве случаев приводит к возникновению поверхностных сжимающих напряжений, способствующих повышению сопротивления усталости. ППД также уменьшает шероховатость поверхности и залечивает ультрамелкие трещины, в результате чего уменьшается чувствительность материала к концентраторам напряжений.

К шестому классу относится хорошо известный метод упрочнения метал-

лов объемной термической обработкой. В технологии термической обработки основное внимание уделяется выбору температуры нагрева, в зависимости от марки стали, времени выдержки при этой температуре для завершения фазовых и структурных преобразований и скорости охлаждения, обеспечивающей образование необходимой структуры. При этом очень важным является выбор температуры нагрева таким образом, чтобы, с одной стороны, мог образоваться гомогенный аустенит, т.е. успели раствориться карбидные частицы, а с другой, – не состоялся бы рост зерна, который приведет к охрупчиванию стали. Не менее важным является и выбор охлаждающей среды, которая, обеспечивая скорость охлаждения выше критической, не оказывала бы влияния на большие закалочные напряжения.

К недостаткам объемных методов термической обработки можно отнести:

- энергоемкость;
- экологически вредное производство;
- деформации (искривления) изделий;
- эти методы не всегда обеспечивают необходимые триботехнические характеристики изделия.

На сегодня все ответственные изделия из стали и чугуна в процессе их изготовления подвергаются какому-либо виду термической и (или) химико-термической обработки. Для многих изделий используют комплексные методы обработки, сочетающие объемное и поверхностное упрочнение. Так, азотированию предшествует объемная закалка с высоким отпуском, но после азотирования никакая термическая обработка не выполняется.

Износостойкость коренных и шатунных шеек вала в значительной степени зависит от твердости их поверхности. Высокая твердость достигается поверхностной закалкой шеек с нагревом токами высокой частоты (индукционная закалка) или азотированием. После поверхностной закалки, как правило, проводят ППД галтелей для уменьшения растягивающих напряжений, возникающих в месте выхода закаленного слоя на щеку.

Индукционная закалка широко используется при изготовлении коленчатых валов для двигателей сельскохозяйственной техники. Более нагруженные коленчатые валы двигателей для автомобильного, железнодорожного и морского транспорта чаще упрочняются азотированием, которое не только снижает износ шеек вала, но и повышает их усталостную прочность.

Азотирование используется как для стальных, так и для чугунных валов, как правило, для валов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. При этом, в отличие от поверхностной закалки, твердость шеек сохраняется до температуры примерно 500 °С.

В ряде зарубежных технологий (например, фирмы «Хонда») для повышения усталостной прочности и увеличения износостойкости шеек коленчатых валов применяют низкотемпературное цианирование (Тенифер-процесс).

Общим недостатком, кроме экономического, для широко используемых в настоящее время процессов упрочнения коренных и шатунных шеек коленчатых валов является деформирование детали. Основные способы устранения этого явления таковы:

- увеличение припуска под механическую обработку;
- правка (рихтовка).

Однако после упрочнения детали с увеличенным припуском в процессе ее дальнейшей механической обработки (шлифования) с целью устранения деформирования и получения качественной детали может возникнуть разнотолщинность упрочненного слоя, а иногда и полное его отсутствие в отдельных местах. Это приводит к резкому снижению работоспособности коленчатого вала.

Правку валов, как правило, выполняют двумя способами: с приложением статической нагрузки и выдержкой в течение определенного времени без нагрева или приложением статической нагрузки с одновременным нагревом вала. Однако, и в том, и в другом случае в процессе правки возможно образование трещин, а правка в нагретом состоянии сопровождается снижением прочности коленчатого вала.

Следует отметить, что, поскольку азотирование является конечной термической обработкой, с точки зрения деформации она имеет преимущества перед закалкой. Но ее главным недостатком, как уже отмечалось, является очень большая продолжительность.

Говоря об обеспечении высоких трибологических характеристик поверхностных слоев, необходимо остановиться еще на одном важном вопросе. Дело в том, что все рассмотренные методы поверхностного упрочнения сводятся к повышению твердости материала поверхностного слоя детали. В то же время известно, что прямая зависимость между износостойкостью и твердостью не всегда реализуется. На нее влияют и другие механические свойства, например, пластичность, ударная вязкость, их распределение по поверхности.

Из вышесказанного следует, что традиционные способы повышения износостойкости материала деталей только за счет увеличения их твердости во многих случаях оказываются неэффективными. Это объясняет тот факт, что ресурс двигателей до капитального ремонта, в том числе и с использованием рассмотренных способов упрочнения, в реальных условиях эксплуатации оказывается существенно ниже нормативного.

1.4. Основные способы ремонта коленчатых валов двигателей

В настоящее время ни одно изделие, тем более сложная современная транспортная техника, не может обойтись без ремонта и технического обслуживания, являющихся неотъемлемым этапом процесса эксплуатации и обеспечивающих в течение всего периода эксплуатации необходимый уровень безотказности при наименьших затратах времени и средств.

Потеря работоспособности машины при ее эксплуатации за счет износа – необратимый процесс, протекающий, в зависимости от конструкции машины и условий ее эксплуатации, с большей или меньшей интенсивностью. Ремонт техники осуществляется различными методами.

Для восстановления работоспособности изношенных коленчатых валов, в первую очередь, необходимо получить ремонтную заготовку. Ремонтная заготовка – это состояние восстанавливаемой детали после создания припуска на поверхности для дальнейшей механической обработки.

Припуск на дальнейшую механическую обработку ремонтной заготовки получают одним из трех способов. Первый из них предполагает формирование припуска из материала, оставшегося на поверхности восстанавливаемой детали, для его обработки под один из ближайших ремонтных размеров. Во втором случае материал детали перемещают в зону следующей обработки пластической деформацией. В третьем случае на поверхность возобновляемого элемента наносят слой металла с последующей обработкой под нужный размер.

Ремонтные заготовки получают без расхода или с расходом материалов на начальные заготовки (рис. 1.9). В первом случае элементы детали обрабатывают под ремонтные размеры, и как припуск используют изношенные поверхностные слои материала.

Коленчатые валы двигателей в процессе эксплуатации транспортных средств проходят межремонтное обслуживание, основная цель которого заключается в предотвращении отказов и ликвидации последствий недопустимого износа материала. В случае обнаружения недопустимого износа шейки коленчатого вала он направляется на капитальный ремонт, заключающийся в проведении работ по восстановлению их ресурса.

Восстановление ресурса коленчатых валов тракторов, автомобилей, железнодорожного и морского транспорта во многих случаях выполняют путем обработки коренных и шатунных шеек под ремонтный размер. Это наиболее простой и с экономической точки зрения недорогой метод. Однако, в связи с тем, что глубина упрочненного слоя шеек при изготовлении

валов, как правило, не превышает 0,25-0,40 мм, а ремонтные размеры, в свою очередь, отличаются друг от друга на 0,25 мм, то, начиная уже со второго ремонтного размера, в коленчатых валах, из-за снятия упрочненного слоя металла, интенсивность износа коренных и шатунных шеек растет на 15-20 %, что резко сокращает ресурс работы двигателя.

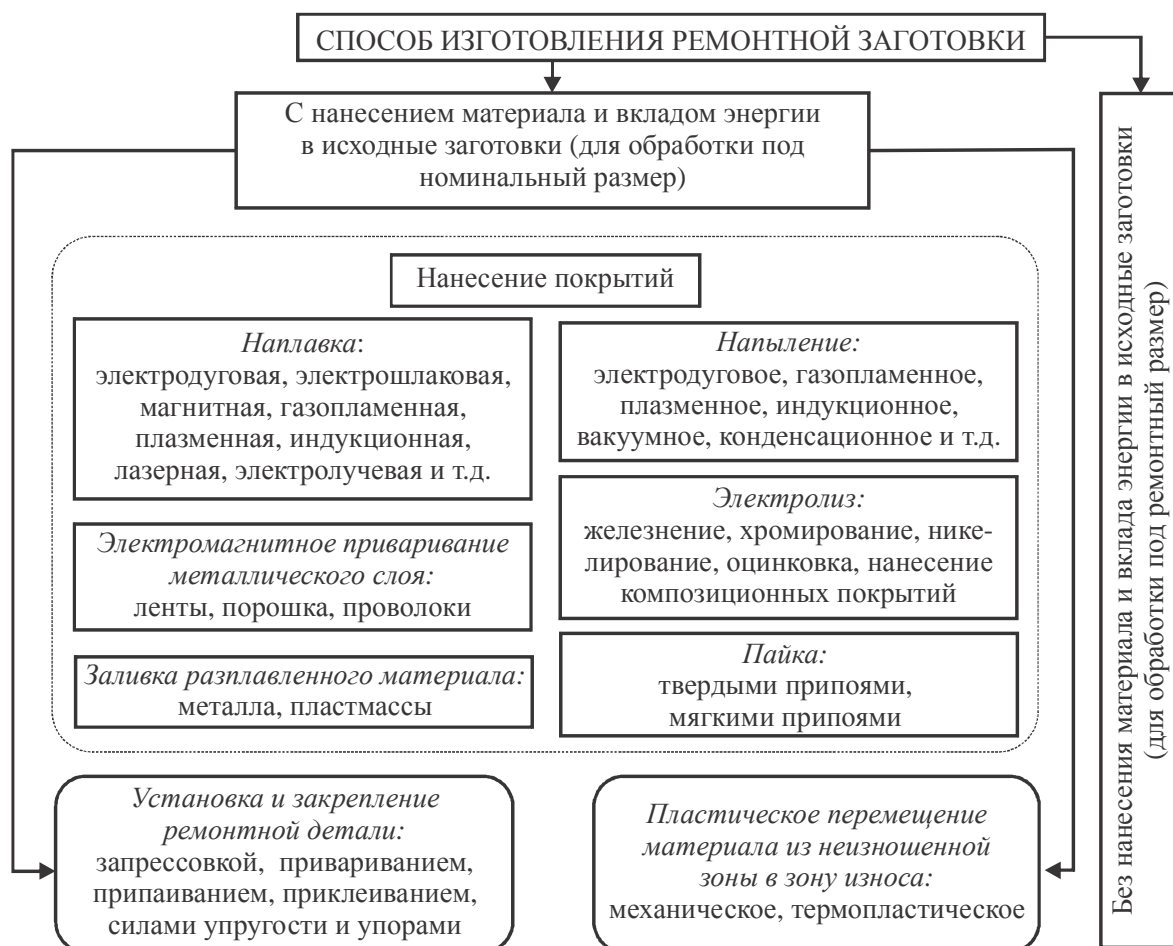


Рис. 1.9 – Классификация способов создания ремонтных заготовок

Другим методом восстановления работоспособности коленчатых валов, является наращивание уменьшенных размеров коренных и шатунных шеек путем нанесения покрытий с последующей обработкой до номинального размера.

Как показано на рис. 1.9, восстановление размеров поверхностей шеек обеспечивается наплавлением, приваркой пластин, напылением, плакировкой, электролизом и другими способами.

В ремонтном производстве коленчатых валов достаточно широкое применение нашли такие способы: электродуговая и газовая наплавка, газотермические методы нанесения покрытий, газопламенное, детонационное и плазменное напыление, электролитические способы – хромирование и железнение.

Наплавление заключается в расплавлении поверхности детали и наплав-

ленного материала в виде проволоки или порошка под действием электрической дуги или иного концентрированного источника тепла и перенос расплавленного металла на поверхность детали. Основным недостатком этого способа является значительный нагрев поверхности восстанавливаемой детали (более 1000° С), провоцирующий нежелательные структурные изменения основы. Дальнейшее же охлаждение приводит к образованию микротрещин в наплавленном слое, в результате чего усталостная прочность деталей снижается на 35-60 %.

В настоящее время получили мощное развитие газотермические способы нанесения покрытий, металлизация, газопламенное, детонационное и плазменное напыления. Характерной особенностью этих способов образования покрытий является отсутствие или минимальная степень расплавления металла основы. Их недостатками являются невысокая прочность сцепления покрытия с основой (20-40 МПа). Этот показатель в определенной степени зависит от способа нанесения покрытия и растет в такой последовательности: металлизация, газопламенное, плазменное и детонационное напыление. Кроме того, все газотермические способы нанесения покрытий не исключают поводку (искривление) возобновляемых валов.

При восстановлении коленчатых валов могут применяться электролитические способы нанесения покрытий. Одним из них является хромирование. Однако процесс хромирования коренных и шатунных шеек валов с целью повышения их износостойкости и восстановления первоначального или ремонтного размера не нашел широкого распространения в силу ряда причин: высокой стоимости, недостаточной прочности сцепления хрома с основным материалом, снижения усталостной прочности вала, выкрашивания и отслоения хрома во время работы. При этом прочность сцепления слоя хрома с основным материалом в значительной степени зависит от подготовки поверхности шеек перед нанесением покрытия.

Характеристики прочности электролитического хрома резко снижаются при росте толщины слоя покрытия. Увеличение толщины слоя от 0,1 мм до 0,5 мм приводит к снижению предела прочности в 2-3 раза, что обуславливает сферу применения процесса хромирования для обновления деталей с износом до 0,2 мм. Данный факт ограничивает применение способа хромирования для восстановления коленчатых валов.

В последнее время для восстановления размеров изношенных стальных и чугуновых деталей в промышленности используют железнение, отличающееся технологической простотой получения покрытия, рядом положительных экс-

плуатационных свойств и экономичностью процесса его наращивания. С целью снижения хрупкости покрытий и повышения их износостойкости создают мелкозернистую структуру с помощью легирования марганцем и никелем.

Недостатками процесса железнения является то, что покрытия, полученные этим методом, очень чувствительны к изменению скорости скольжения поверхностей трения. Так, при скорости скольжения от 1 до 2 м/с и температуре контактной зоны 110-130 °С коэффициент трения равен 0,07-0,08. Повышение скорости до 3 м/с вызывает рост коэффициента трения до 0,25 и температуры контактной зоны до 200 °С и выше.

При дальнейшем повышении скорости скольжения коэффициент трения возрастает еще больше, соответственно увеличивается и температура, что приводит к адгезионному схватыванию поверхностей.

Учитывая то, что в процессе движения транспортного средства коленчатый вал двигателя работает в большом диапазоне нагрузок и скоростей, которые колеблются от минимально допустимых до максимальных, широкое внедрение процесса восстановления коренных и шатунных шеек вала способом железнения затруднен. К тому же таким способом не удастся достичь показателей прочности, близких к заданным рабочим чертежам на изготовление данных деталей.

Общим недостатком для электролитических покрытий является наводораживание и, как следствие, повышение хрупкости и интенсивный износ восстановленной поверхности.

В последнее время восстановление коренных и шатунных шеек коленчатых валов осуществляется с помощью дополнительных ремонтных деталей. Суть данного способа заключается в том, что изготавливаются дополнительные детали в виде свернутой ленты или полуколец и крепятся к детали механическим способом, сваркой, пайкой или клеем. Недостатком данного способа восстановления является то, что приваривание дополнительной детали создает термическое воздействие как на материал восстанавливаемой детали, так и на закрепленную деталь, что может привести к уменьшению усталостной прочности всей конструкции.

Анализируя перечисленные способы, можно отметить, что все способы восстановления ресурса коленчатых валов имеют свои преимущества и недостатки. Фактический ресурс отремонтированной техники с восстановленными деталями существенно уступает нормативным показателям и ресурсу новых изделий. Нормативный послеремонтный ресурс выдерживают, например, только 40-60% двигателей легковых автомобилей и 30-40 % двигателей грузовых автомобилей, что, как правило, обусловлено, кроме несовершенства способов ремонта, также и различными условиями работы техники.

1.5. Применение дискретного упрочнения для поверхностей деталей

Анализируя приведенные выше способы упрочнения и восстановления ресурса коренных и шатунных шеек коленчатых валов, следует выделить общие для них недостатки:

- стандартные упрочняющие способы и традиционные технологии получения износостойких покрытий в большинстве своем не обеспечивают необходимого уровня износостойкости и усталостной прочности деталей одновременно;
- упрочняющие покрытия не обладают высокой прочностью сцепления с деталью;
- стандартные упрочняющие процессы достаточно энергоемкие;
- процессы, связанные с нанесением покрытий, вызывают разогрев основного металла, что приводит к его разупрочнению, и могут сопровождаться образованием трещин вследствие резкого градиента температур;
- технологии, использующие объемную термическую обработку, сопровождаются деформациями деталей, для устранения которых необходимы увеличенные припуски под механическую обработку.

Таким образом, существующие способы ремонта коленчатых валов не позволяют получить необходимый уровень эксплуатационных характеристик трибосистем, что обуславливает значительно меньший ресурс восстановленных деталей по сравнению с требованиями госстандартов.

Сказанное относится не только к восстановлению валов, но и к их изготовлению, поскольку существующие технологии их упрочнения тоже не обеспечивает необходимого сочетания свойств сердцевины и поверхности деталей, о чем шла речь ранее.

В последние годы активное развитие получили процессы дискретной обработки поверхностей, которые позволяют получить на них чередование в заданной последовательности (дискретно) высокопрочных и пластических микроучастков, аналогично естественным композиционным материалам, армированным твердыми и прочными фазами. Как известно, такая структура обеспечивает высокую конструкционную прочность материала, то есть позволяет одновременно получить высокие показатели прочности, пластичности, вязкости разрушения.

Для пар трения задача значительно усложняется, поскольку необходимо не просто повысить конструкционную прочность материала вала, но и обеспечить высокие трибологические характеристики поверхностей (шеек),

работающих в контакте с контртелом (вкладышем), и при этом не увеличить изнашивающей способности материала шейки, то есть не привести к ускоренному износу вкладыша.

В последнее время интенсивное распространение получили кластерные покрытия. Суть метода нанесения кластерных покрытий заключается в том, что на функциональные поверхности изделия методом электрохимического осаждения наносится покрытие из хрома или никеля с ультрадисперсными износостойкими частицами карбида кремния и/или алмаза (4-6 нм).

Подобная структура может образоваться также при локальном воздействии на материал механических, тепловых, магнитных и других полей, которые инициируют в его различных участках фазовые и структурные превращения.

Эффективное применение в различных отраслях техники для повышения износостойкости деталей получил способ создания поверхностей с равномерно расположенными микроуглублениями. Он довольно успешно используется в цилиндрах двигателей, подшипниках, плунжерах и т.п.

Микроуглубления, главным образом, обуславливают контактные способности поверхности – улучшают смазку, повышают сопротивление адгезии и коррозии, сокращают период приработки. В отличие от термического влияния на «шероховатость» для таких поверхностей введено понятие «микрорельеф и макрорельеф» поверхности, характеризующий наличие в поверхностном слое дискретных или непрерывных углублений.

К наиболее исследованным методам создания рельефа принадлежит вибрационное прокатывание (пластическая деформация). Микро- и макроуглубления на поверхности детали можно рассматривать как резервуары, где сосредотачивается смазка. Для сравнительной оценки маслозадерживающей способности поверхностей с рельефом предложен термин «маслоемкость».

Развитая система углублений обеспечивает возможность проникновения смазочной среды в зону трения, способствует образованию вторичных структур. Равномерный микро- и макрорельеф обеспечивает локализацию абразивных частиц среды и продуктов износа, снижает вероятность заклинивания пары трения. Циркулирующая в углублениях смазка улучшает охлаждение контактной поверхности.

Исследования проф. Б.А. Ляшенко (Институт проблем прочности им. С. Писаренко НАН Украины) в области адгезионного и когезионного износа положили начало развитию новых технологий нанесения дискретных износостойких покрытий на детали электроискровым легированием. Основная суть создания износостойких дискретных покрытий заключалась

в нанесении на рабочую поверхность детали дискретного (островкового) покрытия и его дальнейшем пластическом деформировании. Несмотря на значительное увеличение износостойкости материала деталей с дискретными покрытиями, этому методу также присущи недостатки. Так, детали с дискретными покрытиями отличаются повышенной изнашивающей способностью из-за высокой шероховатости поверхности упрочненных деталей.

В течение последних десятилетий в разных областях науки и техники делались попытки разработки новых нетрадиционных способов упрочнения деталей, которые были бы лишены многих недостатков классических технологий. Таким новым процессом может стать способ формирования износостойкой поверхности детали, в основе которого лежит дискретное упрочнение электроискровым методом (патент № 79336, Украина).

Исходя из вышесказанного, разработка научно-технологических основ повышения ресурса двигателей и ответственных деталей силовых узлов за счет использования дискретного упрочнения и родственных технологий является перспективным направлением повышения их триботехнических характеристик.

1.6. Инженерия поверхности деталей машин как базовое направление повышения износостойкости и выбора способа упрочнения поверхностей тяжело нагруженных изделий

В современном машиностроении в последнее десятилетие возникло приоритетное направление – поверхностное упрочнение и нанесение упрочняющих защитных покрытий, которое получило общее название «инженерия поверхности» (surface engineering). Начиная с 90-х годов прошлого столетия Северная Америка, Япония и Западная Европа вкладывают в это направление ежегодно около 150 млрд. дол. США. Использование поверхностных упрочняющих технологий позволяет повысить долговечность деталей машин от 2 до 100 раз. При этом уменьшается расход энергии и обеспечивается возможность интенсификации многих производственных процессов.

На сегодня известны около 200 технологий инженерии поверхности. Согласно представлениям авторов фундаментального труда [1], который обобщает их исследования последних десятилетий в области инженерии поверхности деталей машин, способы обработки или создания поверхностных слоев последних следует делить по методам исполнения на механические, термомеханические, термические, химико-термические, электрохимические, химические, физические. В рамках этой классификации основными методами, нашедшими на сегодня широкое применение, являются: газотермическое напыление, вакуумное осаждение, наплавление, модифицирование поверхности концентрированными потоками энер-

гии, электроискровое легирование, деформационное упрочнение, гальванические процессы, химическое осаждение и диффузионное насыщение.

Множество известных на сегодня методов инженерии поверхности деталей машин целесообразно условно разделить на четыре класса: нанесение покрытий, модифицирование поверхностного слоя, технологического обеспечения физико-механических свойств и топографии поверхности, а также комбинированные («гибридные») методы. Исследования показали, что приобретение нужных служебных характеристик поверхностью детали (износостойкости, теплостойкости, коррозионной стойкости, сопротивления окислению, усталостной прочности, контактной жесткости, сопротивления адгезии, антифрикционных или фрикционных свойств, герметичности сопряжений, уплотнения пар трения, удержание смазки, а также декоративно-художественных, экологических, электроизоляционных, теплоизоляционных, режущих и других полезных свойств) происходит через комплекс геометрических и физико-механических характеристик поверхности. К последним, в частности, относятся точность, шероховатость, твердость, микротвердость, опорная площадь, пористость, остаточные напряжения, микроструктура, микрорельеф, макрорельеф, адгезия, текстура, прочность сцепления с основой и др. (рис. 1.10).

Общими недостатками газотермического напыления как метода нанесения покрытий (газотермических, детонационных, электродуговых, плазменных и др.) является невысокая сцепляемость покрытия с основой и пористость последнего [2]. Так, сцепляемость (адгезия), обычно выражаемая касательным напряжением в месте контакта, находится в пределах 40–100 МПа в зависимости от вида напыления. Пористость газотермического покрытия обычно равняется 5–12%. Дополнительные технологические приемы, например, электроконтактное припекание и обкатка "теплого" покрытия недостаточно эффективны, так как позволяют повысить указанные показатели лишь на 10–25%.

Напротив, главным недостатком метода наплавки, основанного на сварке плавлением, является, в отличие от методов напыления, мощное тепловое воздействие на сердцевину детали, приводящее к ее короблению при остывании и формированию в последней трещин и неблагоприятных остаточных напряжений. В этом случае, как и в первом, являющимися одними из основных в машиностроении, поскольку позволяют получать покрытие толщиной в несколько миллиметров, требуется сложная последующая обработка покрытия и детали в целом.

Весь комплекс физических и химических методов нанесения покрытий, называемых в отечественной и зарубежной научно-технической литературе соответственно методами PVD и CVD, обеспечивает толщину нанесенного

слоя в пределах 1–10 мкм. Таким образом, эти покрытия допустимо отнести к классу оболочек. Их реальная толщина является главным недостатком, ограничивающим область применения. Хотя для финишной обработки этих покрытий требуется лишь полирование кругами или пастами.

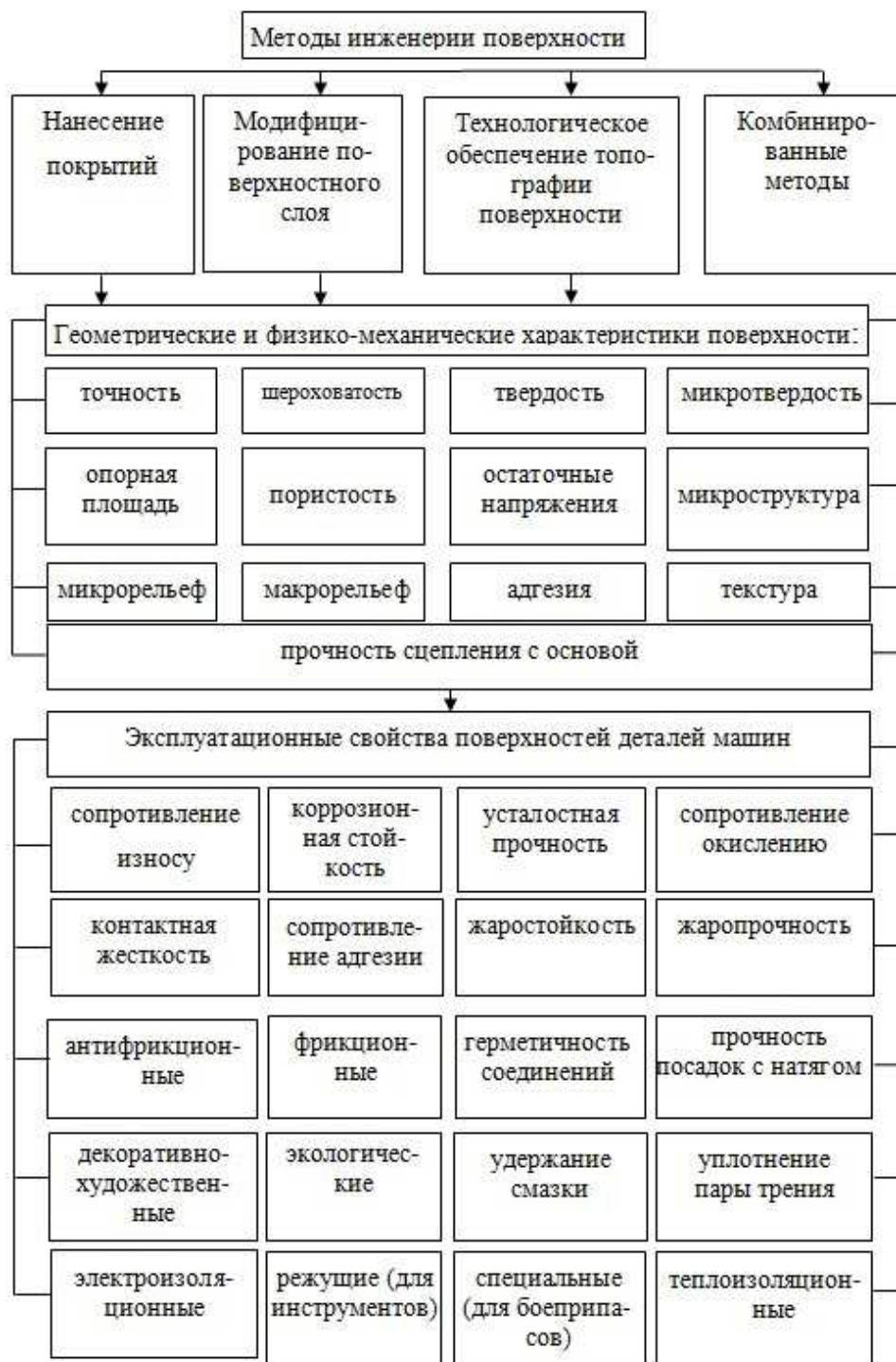


Рис 1.10 – Структурная схема влияния методов инженерии поверхности на свойства деталей машин

В данной работе не рассматриваются нанопокрывтия, которые уместно считать пленками, поскольку их толщина составляет доли микрометра, а

применимость к крупногабаритным изделиям невелика.

Методы инженерии поверхности, основанные на модифицировании поверхностного слоя деталей машин, в отличие от нанесения покрытий, не предполагают изменения размеров изделия за счет дополнительного материала, который вводится в зону обработки (электродного, присадочного, порошкового и т.п.). Модифицирование осуществляется при помощи поверхностного термического (химико-термического) воздействия на поверхностный слой (цементация, азотирование, технологии с использованием токов высокой частоты и т.д.) или холодного пластического деформирования. Однако, высокотемпературные технологии сопровождаются созданием в деталях мощного поля остаточных напряжений и сетки микротрещин, короблением, окислением и другими негативными явлениями и, таким образом, требуют низкотемпературного отпуска, абразивной или другой чистовой обработки. В то же время, значительной части недостатков модифицирования поверхности с помощью процессов, основанных на воздействии на материал мощных источников тепла, можно избежать, если применить для изменения свойств деталей «холодные» технологические и комбинированные методы. Такими методами принято считать все методы обработки материалов резанием лезвийным и абразивным инструментом, процессы поверхностного и объемного холодного пластического деформирования, различные комбинации этих процессов. «Холодные» методы при необходимости интенсифицируются дополнительной энергией, которая дозированно вводится в зону обработки [2].

Комбинированными методами принято считать нанесение покрытий или «горячее» модифицирование с последующей финишной обработкой поверхности резанием или пластическим деформированием.

Все виды процессов холодного пластического деформирования пригодны для модифицирования поверхностного слоя широкой номенклатуры деталей машин, которые изготавливаются практически со всех пластических металлов и сплавов при значениях относительного удлинения свыше $\delta > 3\%$ (ферритно-перлитные и аустенитные доэвтектоидные стали, латуни, бронзы, деформируемые алюминиевые, титановые и магниевые сплавы и др.). При этом эффективными являются объемные и поверхностные процессы, которые осуществляются по кинематике скольжения и качения при обработке внешних и внутренних замкнутых и свободных поверхностей, включая фасонные, а также все виды деформирования в сочетании с лезвийной и абразивной механической обработкой. Исследования физико-механических и геометрических свойств поверхностей и поверхностных слоев деталей после модифицирования их описанными выше методами холодного деформирования показали наличие в них полезных сжи-

мающих остаточных напряжений, величина которых достигает значений предела текучести обрабатываемого материала, повышения микротвердости в 1,5–2 раза, а также возникновение текстуры необходимой глубины и интенсивности. Предел прочности обрабатываемого материала при этом остается неизменным, а структурных превращений нет. Результаты исследований позволяют сделать вывод о существенном улучшении эксплуатационных показателей деталей методами холодного пластического деформирования непосредственно в процессе их изготовления и рекомендовать эти методы для широкой номенклатуры деталей при ремонте, восстановлении и изготовлении различных машин.

На рис. 1.11 представлена классификация указанных процессов, выполняемых по схеме скольжения [3]. Эта схема более эффективна, чем схема качения (обкатывание или раскатывание роликами или шариками и т.д.), потому что за счет более интенсивных процессов трения возможно получить более высокие показатели твердости, полезных остаточных напряжений, текстурированности, глубины упрочненного слоя детали и т.п.

Следует отметить, что рассмотренные и отраженные на рис. 1.11 процессы, в частности, сквозное деформирующее протягивание отверстий, т.е. протягивание с конечной толщиной стенки, когда деформация выходит на внешнюю поверхность детали, является, в отличие от большинства подобных процессов, наряду с другим, формообразующей операцией. Это означает, что сквозное деформирующее протягивание позволяет изменить размеры изготавливаемой или ремонтируемой детали. Такой процесс в работах Ю.Г. Проскурякова и его учеников называется «объемное дорнование», что идентично термину школы А. М. Розенберга «протягивание с конечной толщиной стенки».

Все сказанное выше касается сплошных (континуальных) покрытий, общим недостатком которых является резкое отличие их физико-механических свойств от соответствующих свойств основы. Это может привести к растрескиванию и отслоению покрытий при повышении контактных давлений, изменении условий трения и колебаний температуры в паре трения, а также изменении характеристик среды, в которых работает машина. Применение многослойных и градиентных покрытий не позволило решить эту проблему.

Ряд исследований, в том числе и авторов настоящей работы, показали, что ключом к этой проблеме является создание так называемых дискретных, т.е. несплошных покрытий. Несущие «островки» такого покрытия обладают необходимыми физико-механическими свойствами (прочностью, износостойкостью, контактной жесткостью и пр.). Эти участки прочно удерживаются на основе, поскольку имеют в своем основании переходный слой, близкий по своим физико-механическим свойствам и к сердцевине, и к покрытию. В тоже время «островки» покрытия может приспосабливаться к изменяющимся условиям работы па-

ры трения и относительно независимо от «островков»-соседей упруго смещаться в ту или иную сторону. Материал основы изнашивается более интенсивно, чем износостойкие составляющие поверхности детали в соответствии с законом Шарпи. В результате уже в период приработки пары на поверхности детали образуются разновысокие участки: износостойкие несущие и более мягкие материала матрицы, которые путем самоорганизации создают систему лабиринтов для смазки.



Рис. 1.11 – Классификация процессов холодного пластического деформирования протягиванием по кинематике и назначению

При выборе метода создания износостойкого прочного покрытия авторы остановились на довольно простой идее электроискрового легирования, которое по своей природе является дискретным процессом, способным упрочнить и повысить износостойкость любых, в том числе и крупных, поверхностей тяжелона-

груженных деталей машин при их изготовлении и многократном ремонте.

Кроме того, внимание авторов также сосредоточено на методе корундирования поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, который дает возможность реализации естественного перехода от сердцевины материала к образованному на поверхности при его электрохимическом превращении прочному слою с высокой адгезией и низкой износостойкостью.

Как развитие исследованных технологий предложен также принципиально новый метод, заключающийся в сопряжении в паре трения алюминиевой детали, с образованным корундовым слоем, с одной стороны, и стальной или чугуновой деталью, обработанной методом дискретного упрочнения, – с другой. В результате образуется уникальная комбинация свойств, распределенных и по поверхности контакта в пределах одной детали, и по глубине – в пределах другой, а также между контактирующими деталями. В результате такого сочетания достигается достаточно продуктивный результат по всему комплексу триботехнических характеристик исследуемых пар деталей.

Обращается также внимание и на другие методы упрочнения, основной идеей которых является повышение служебных характеристик наиболее нагруженных деталей за счет модификации свойств их поверхностных слоев.

В работе основное внимание уделяется обоснованию предложенных технологий, в первую очередь – применительно к двигателям внутреннего сгорания. Это предваряется изложением методологических основ синтеза проектно-технологических решений на базе обобщенного параметрического моделирования. Завершается изложение материала примерами решения прикладных задач для конкретных машиностроительных конструкций.

Литература к разделу 1

1. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наук. думка., 2007. – 558 с.

2. Канарчук В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата // К.: Вісник НТУ, 2000. – Вип. 4. – С. 3–14.

3. Канарчук В.Є., Дмитрієв М.М., Посвятенко Е.К. Поліпшення експлуатаційних показників машин технологічними методами, побудованими на холодному пластичному деформуванні // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. – К.: НТУ. – 2000. – Вип. 9. – С. 6–16.

РАЗДЕЛ 2

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

При разработке принципиально новых технологий одной из основных проблем является проблема поиска оптимального решения в нечетко определенном и варьируемом пространстве факторов, при нечетких условиях, ограничениях и собственно при неопределенных характеристиках самого технологического процесса. Это касается также и в первую очередь научно-технической проблемы разработки эффективных технологий поверхностного упрочнения тяжело нагруженных элементов машин, находящихся в подвижном контакте. Как известно, традиционные технологии решения данной проблемы имеют целый ряд принципиальных недостатков, среди которых – накопление нежелательных остаточных деформаций детали или узла и неэффективное сочетание механических характеристик материала в поверхностном слое и в глубине материала, из которого изготовлен упрочняемый элемент. Важно и то, что традиционные технологии могут улучшаться в основном только за счет компромиссных, а не оптимизационных процедур. Выход из этой ситуации – отказ от жесткой регламентации факторов, поиск принципиально новых физико-механических процессов и оптимизация их влияния на комплекс критериев, определяющих характеристики поверхностного упрочнения элементов машин. Однако для реализации данного подхода нужно, во-первых, как отмечалось выше, разработать теоретическую основу, математический аппарат для многовариантного исследования и оптимизации характеристик состояния поверхностного слоя в сочетании с состоянием материала на глубине, а, во-вторых, собственно провести с применением разработанных подходов процесс исследований и синтеза схемы и параметров новой технологии. Для этого нужно решить следующие научные проблемы и прикладные задачи:

1. Разработка новых теоретико-множественных подходов к генерации математических, численных и физических моделей исследуемых и создаваемых технологий и состояний упрочняемых элементов машин, характеризующихся единственным способом описания, приспособленностью к работе с нечеткими, пополняемыми и уменьшающимися множествами факторов, а также интегрированностью в современные методы научного исследования.
2. Реализация разработанного подхода в комплексной математической

модели исследования напряженно-деформированного состояния элементов машин, находящихся в состоянии контактного взаимодействия.

3. Разработка специализированного программно-модельного комплекса для численных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) тел сложной формы, структуры, естественным образом интегрирующегося в современные системы компьютерного моделирования.

4. Формирование мощного программно-аппаратного комплекса, обладающего способностью решать масштабные научно-технические задачи, возникающие при многовариантных исследованиях физико-механических систем с многомиллионным количеством неизвестных.

5. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов исследуемых машин, поверхности которых обработаны по новой технологии упрочнения, предлагаемой в работе, и разработка научно обоснованных рекомендаций по обоснованию технологических режимов предложенного технологического процесса.

Поскольку перечисленные научные проблемы являются новыми, актуальными и важными для широкого класса задач, которые в настоящее время стоят перед механикой, технологией машиностроения и машиноведением, то для их решения были привлечены передовые теоретические, компьютерно-информационные и аппаратные разработки, системы и средства. Сами научные разработки, их численная и программно-аппаратная реализация осуществлены в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» в течение длительного периода, изложенные в сотнях публикаций, освещены на десятках конференций, семинаров, симпозиумов. Ниже приведены авторские разработки в порядке перечня научных проблем и прикладных задач.

2.1. Теоретико-множественный подход к генерированию моделей физико-механических процессов и состояний сложных и сверхсложных механических систем

Если рассматривать проблему разработки новых технологий поверхностного упрочнения тяжелонагруженных элементов машин как одну из составляющих исследования, анализа и синтеза элементов сложных и сверхсложных механических систем, то можно вычленить общие черты: с одной стороны, наличие большого количества инструментов исследований напряженно-деформированного состояния и других состояний и физико-механических процессов, а с другой стороны – принципиальные трудности, которые возникают при решении многовариантных задач параметрического

или структурного анализа, а тем более – синтеза. Стоит отметить, что наиболее мощным методом исследований реакции сложных механических систем на внешние воздействия является метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов в настоящее время достиг достаточной глубины теоретического обоснования. Он реализован в виде современных программных пакетов (ANSYS, NASTRAN), которые обладают широкими функциональными возможностями для построения конечно-элементных моделей при моделировании различных физико-механических процессов, а также развитыми средствами постпроцессинга. Кроме того, средства конечно-элементного моделирования интегрируются в системы автоматизированного проектирования (Pro/ENGINEER (Creo), CATIA, SolidWorks). Это позволяет решать не только задачи анализа НДС, но и отдельные задачи синтеза. В частности, достаточно просто организуются: анализ чувствительности к изменению конструктивных параметров, параметрический анализ, параметрическая оптимизация. Но возможности анализа и синтеза исчерпываются, как только возникает задача структурного синтеза или построения оптимизационных процедур на множествах, задаваемых системой сложных ограничений и связей. Следующее затруднение – неприспособленность существующих систем компьютерного проектирования, анализа и синтеза к оперированию с трудноформализуемыми данными. И, наконец, существует проблема взаимосвязи в системе «проектант – программный комплекс». Как правило, для исследования сложных и сверхсложных механических систем необходимо привлекать высококвалифицированных исследователей, в совершенстве владеющих тем или иным программным продуктом. На практике же нужно оперативное проведение большого количества исследований, причем исследователями, которые являются специалистами в общих вопросах проектирования и разработки технологий.

Особенно ситуация обостряется в процессе проектирования новых машиностроительных конструкций и технологий их упрочнения, когда все приведенные выше обстоятельства действуют в совокупности. В связи с этим возникают следующие актуальные задачи:

1. Разработка общего метода описания расчетных моделей сложных и сверхсложных механических систем, естественным образом учитывающих количественные, качественные, структурные характеристики исследуемых объектов.

2. Разработка структуры интегрированной системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза сложных конструкций на основе сочетания геометрического, конечно-элементного моделиро-

вания и учета специфических особенностей проектируемых изделий.

3. Реализация предложенного подхода при решении конкретных прикладных задач.

Рассмотрим вопросы, связанные с исследованием элементов сложных и сверхсложных механических систем. При этом основным требованием является получение необходимых технических характеристик изделия T . Существует определенная связь между характеристиками T и множеством параметров P :

$$T = T(P), \quad (2.1)$$

где P – множество, содержащее геометрические, технологические параметры и условия эксплуатации.

Решение обратной задачи, то есть определение такого множества

$$P = P(T), \quad (2.2)$$

которое обеспечивает заданные технические характеристики проектируемого объекта, является сложной задачей, которая не имеет в большинстве случаев однозначного оптимального решения.

Поскольку решение задачи (2.2) необходимо делать путем численных, аналитических и экспериментальных исследований, то соответственно при этом определяется множество параметров

$$\bar{P} = \bar{P}(\bar{P}_m), \quad (2.3)$$

где \bar{P}_m – расширенное множество параметров, характеризующих аналитические, расчетные или экспериментальные модели, способы вычислений и измерений. Здесь \bar{P} – множество вычисленных или измеренных параметров P . Степень близости значений соответствующих параметров из множества P и \bar{P} является некоторой функцией \bar{P}_m . Естественным, что при использовании достаточно адекватных моделей, эффективных методов решения систем уравнений и неравенств, а также рациональных алгоритмов и схем измерений, элементы множества \bar{P} приближаются к элементам множества P , и тогда соотношения (2.1), (2.2) можно формализовать в виде некоторого соотношения

$$\Psi(P^\sim) = 0, \quad (2.4)$$

где P^\sim – глобальное множество параметров, характеризующих все стороны проектирования, изготовления, использования, модернизации и утилизации машиностроительной конструкции.

Множество P^\sim состоит из подмножеств, количественно и качественно

отличающихся друг от друга. Так, технические характеристики T являются или заданными величинами, или максимизируемыми. Множество P является, с одной стороны, зависимым от T , а с другой стороны – может влиять на T (или быть ограничивающим фактором, или стимулирующим). Параметры \bar{P}_m , входящие в P^{\sim} через соотношение (2.3), влияют на технические характеристики неявно. В связи с этим определение этой зависимости уже является достаточно сложной самостоятельной задачей. Например, параметры расчетных, аналитических моделей и моделей для экспериментальных исследований являются именно теми, которые могут варьироваться в довольно широких пределах. Это же относится и к параметрам P .

Основная идея расширенного параметрического подхода [1, 2] заключается в том, что реализованный в системах CAD/CAM/CAE обычный параметрический подход при использовании специализированных модулей может быть расширен. Действительно, в рамках этих модулей удобно органи-

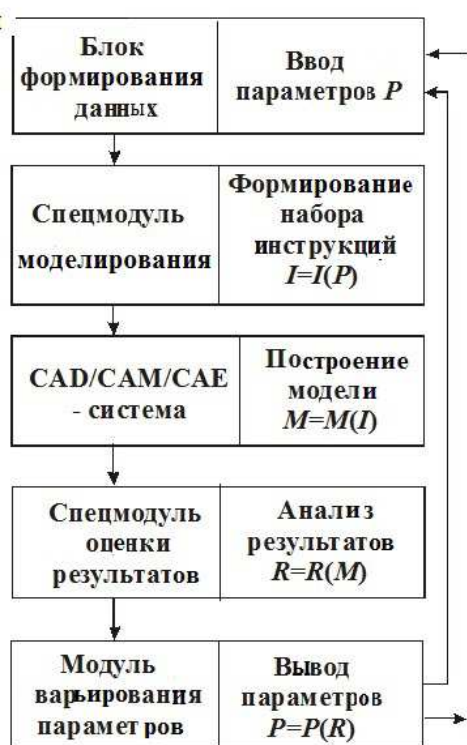


Рис. 2.1 – Расширенный параметрический подход в процессе проектирования, исследования и изготовления элементов сложных механических систем

зовать не только тривиальную параметризацию, но и принять как обобщенные параметры, например, структуру расчетной модели, конструктивное решение, тип конечно-элементной разбивки, способы реализации соединения элементов сложной механической системы [3-7]. При этом не требуется создание специального метаязыка, формализующего указанное описание модели. Для того или иного класса конструкции, исходя из опыта проектирования, изготовления и исследования, строится внутренний алгоритм, осуществляющий по простому набору входных данных построение набора инструкций на языке команд систем CAD/CAM/CAE/PDM высокого уровня для создания соответствующей модели (рис. 2.1).

Предложенная схема позволяет не только оперировать с трудноформализуемыми данными, но также учитывать сложные системы связей между ними. Это, в свою очередь, позволяет организовать процедуру целенаправленного перебора вариантов исследуемых объектов. Важнейшей особенностью и преимуществом предложенного

подхода является нечувствительность к типу, виду и составу множества P . Таким образом, обобщенные параметры могут выступать не только количественные (как в традиционном подходе), но и как качественные параметры. Кроме того, сам состав множества P может быть обобщенным варьируемым параметром. При этом важным является то, что при использовании данной технологии не требуется переработка создаваемой системы автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем. Специальный модуль встраивается в уже функционирующую систему и придает ей новые качества.

В то же время при этом возникает другая проблема. Она заключается в том, что в процессе автоматизированного проектирования элементов сложных и сверхсложных механических систем возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем, применяемых для исследования их напряженно-деформированного состояния. Применение расчетных схем в методе конечных элементов требует в качестве исходных данных знания параметров конечно-элементного разбиения исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В дальнейшем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие жесткостные характеристики проектируемых изделий.

Существующие в настоящее время численные методы исследования напряженно-деформированного состояния, среди которых ведущее положение занимает метод конечных элементов, не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. Актуальной становится задача обеспечения достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании элементов сложных механических систем. В работе предлагается расчетно-экспериментальный метод исследований [8–14], при использовании которого основным результатом выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых объектов, основанный на соединении возможностей МКЭ и различных методов экспериментальных исследований.

Задачу исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем можно рассматривать следующим образом. Пусть \mathbf{R} – реальный объект, поведение которого формально описывается с помощью в общем случае неизвестного оператора L_R :

$$L_R(u_R, P_R, f, t) = 0, \quad (2.5)$$

где u_R, P_R, f, t – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Математическую модель **M**, получаемую в результате процесса идеализации **I**, описывает известный оператор L_M :

$$L_M(u_M, P_M, f, t) = 0, \quad (2.6)$$

где в скобках – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно.

Численную модель **N**, получаемую в результате процесса дискретизации **D**, описывает в каждом конкретном случае оператор L_N :

$$L_N(u_N, P_N, f, t) = 0. \quad (2.7)$$

Индексы в данном выражении соответствуют некоторой создаваемой численной модели изучаемого объекта и явления.

Численная модель подразумевает совокупность собственно дискретизированных уравнений, численных методов их решения, алгоритмов и программного обеспечения.

Если объект или его физическая модель (при физическом моделировании **F**) поддаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представления) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель **E**, поведение которой в операторном виде можно записать следующим образом:

$$L_E(u_E, P_E, f, t) = 0. \quad (2.8)$$

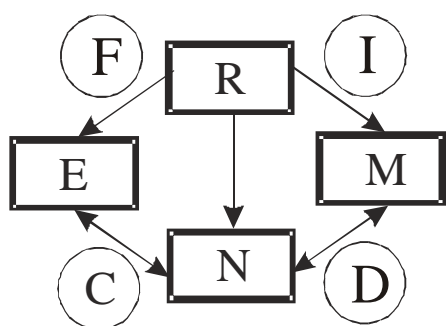


Рис. 2.2 – Общая схема соотношения этапов исследования элементов сложных и сверхсложных механических систем: **R** – реальный объект; **M** – математическая модель; **N** – численная модель; **E** – экспериментальная модель; **F** – физическое моделирование; **I** – идеализация; **D** – дискретизация; **C** – сравнение

Соотношения (2.5)–(2.8) описывают различные формы реального объекта и исследуемого явления (на рис. 2.2 приведена схема исследования). В схеме на рис. 2.2 процесс сравнения данных численных и экспериментальных исследований отмечен как **C**.

Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем в

автоматизированном режиме.

Как показывает практика, именно этап сравнения результатов численных и экспериментальных результатов, причем в автоматизированном режиме, разработанный недостаточно: Нет отработанных механизмов *сравнения полей* u_R, u_M, u_N, u_E ; не проводится *верификация* модели в части достоверности параметров P, f ; не определяется *полнота* модели (полнота множества P, f); не проводится *рационализация* моделей (определение значимых факторов).

Исходя из предположений, что этап **I** – достаточно корректный; этап **D** – в принципе отработанный в литературе; этап **F** – описанных далее в работе методов достаточно точный, требование соответствия результатов исследований **R, M, N, E** предполагает соответствие результатов в звене **C** (см. рис. 2.2).

В реальных случаях вследствие того, что этап **I** – недостаточно «полный», подробный; на этапе **F** присутствуют погрешности физического моделирования, измерений, расшифровки; на этапе **D** нельзя избежать погрешностей дискретизации (размеры и расположение сетки конечных элементов, типы КЭ, методы решения систем уравнений), возникает несоответствие в конкретной цепочке **C**.

Поскольку в схеме на рис. 2.2 этап **I** – это аппарат механики деформируемого твердого тела, достаточно разработанный для большей части спектра возникающих задач моделирования реакции сложных механических систем на различные типы действий; этап **M** – комплекс экспериментального моделирования, который дает высокую интегральную точность измерения, в т.ч. на *реальном* объекте; этап **D** – МКЭ, который в принципе дает достаточно точное и полное описание любой сложности математической модели процесса в механических системах, то на первый взгляд ошибки в цепочках этапов **I–M–D** должны быть сведены (в принципе) к минимуму. Однако при этом узким местом является *обоснованный выбор* на разных этапах следующего:

- этап **D**: *задание параметров дискретизации* (т.е. например, поиск минимально необходимой сетки, описывающей точно и адекватно тот или иной процесс в математической модели (сгущение и сравнение поведения решения при этом не всегда оправданно, поскольку применяемые конечные элементы, например, не дают возможности в полной мере описать конкретный процесс или состояние);
- этап **I**: *определение значимых параметров* (в случае очень большого

количества параметров возникает вопрос их минимизации, то есть поиска необходимого (или оптимального, или рекомендованного) набора параметров);

- этапы **I, D**: *степени полноты множеств* (существенные параметры в модели могут быть проигнорированы (например: модель строится на основе Shell-элементов, а нужен – Solid, в модели использовано жесткое закрепление, а нужно – упругое), отсюда возникает необходимость обоснованного пополнения набора параметров модели).

Сведя к минимуму погрешности в цепочке этапа **F** (физическое моделирование и измерение), а также обоснованно допустив возможность добиться структурного и параметрического изменения математической и численной модели так, чтобы обеспечить адекватное описание объекта R , исходную задачу можно представить в виде определения такой рациональной структуры и множества параметров значений P_N , чтобы с заданной точностью описать поведение реального объекта:

$$P_N^*, f_N^* : I(u_N - u_E) \leq \varepsilon, \quad (2.9)$$

где I – некоторая мера, определяющая несоответствие результатов экспериментальных и численных исследований ($\Delta u_{NE} = u_N - u_E$).

В итоге весь цикл исследований описан в терминах обобщенных параметров, сопровождающих объект исследований на всех этапах создания. исследования и совершенствования.

Таким образом, предложен обобщенный параметрический метод моделирования, который дает возможность обеспечить единый подход к проектированию и исследованию элементов сложных механических систем. При этом:

1. Использование обобщенного параметрического подхода позволяет формализовать задачи структурного и параметрического анализа и синтеза элементов сложных механических систем.

2. На основе предложенной технологии специализированных систем автоматизированного проектирования, изготовления и исследования элементов машиностроительных конструкций и технологий их упрочнения возможно эффективное решение всего комплекса работ при проектировании, модернизации и подготовке производства на отечественных предприятиях. Гибкая, переналаживаемая структура модульного типа позволяет совместить преимущества универсальных компьютерных систем и специальных модулей.

3. Среди основных отличий предлагаемой технологии исследований –

подход к построению моделей. В универсальных системах это осуществляется только за счет инструментария этих систем (хотя и мощных, но не нацеленных на тот или иной класс конструкций). Построение моделей в специализированных системах осуществляется в первую очередь, за счет встроенных средств, нацеленных именно на определенный класс конструкций. Перенацеливание последних осуществляется за счет переработки спецмодуля. Такую технологию можно позиционировать как *интегрированное расширенное параметрическое специализированное моделирование*.

4. Важной характеристикой предложенного подхода является то, что он распространяется не только на этап численного моделирования, но и на экспериментальное исследование, а также на этап математического моделирования.

Разработанные направления интенсификации исследований положены в основу для создания семейств специализированных систем проектирования, исследования и изготовления элементов машиностроительных конструкций и методов их упрочнения.

2.2. Разработка математического аппарата для исследования тяжело нагруженных элементов машин

Рассмотрим элементы механической системы взаимодействующих тел, поведение которой (математическая модель) описывается в общем виде в операторной форме (см. подразд. 2.1)

$$\bar{L}_M(u_M, P_M, f_M, t) = 0, \quad (2.10)$$

где \bar{L}_M – некоторый оператор, структура и параметры которого зависят от типа исследуемого явления, состава системы, граничных условий, нагрузки и условий сопряжения (структурно данный оператор содержит описание всех элементов системы и является обобщением (2.5));

u_M – массив переменных состояния, в отношении которых сформулирована задача, которые создают пространство решений U_M ;

P_M – массив параметров (характеристики физико-механических свойств, геометрические размеры, режимы технологических процессов, величины присоединенных масс, жесткости), которые составляют параметрическое пространство P_M ;

f_M – массив, характеризующий внешние нагрузки (поверхностные, объемные сосредоточены, тепловые нагрузки), действующих на систему, которые составляют пространство нагрузок F_M ;

t – время или другой параметр, характеризующий исследуемое явление

как процесс.

В частности, для большинства случаев удобно сформулировать напряженно-деформированное состояние в перемещениях. В этом случае

$$U_M = \bigcup_s u_{M_i}^{(s)},$$

где $u_{M_i}^{(s)} = u_{M_i}^{(s)}(r_i, t)$ – массив перемещений точек элемента s исследуемой системы функций с радиус-вектором \mathbf{r} с компонентами r_i ($i=1,2,3$), соответствующих моменту времени t . Соответственно

$$P_M = \bigcup_s p_M^{(s)}, F_M = \bigcup_s f_M^{(s)}.$$

Например, для некоторого элемента исследуемой системы (массивное тело) общее уравнение (2.10) расписывается в виде системы уравнений (индексы $*, {}^{(s)}$ опущены) в области Ω , занимаемой телом

$$2\epsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i}; \quad (2.11) \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl}; \quad (2.12)$$

$$\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = 0, \quad (2.13)$$

где $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений и деформаций, связь между которыми задается тензором упругих постоянных C_{ijkl} ;

\bar{f}_i – составляющая объемной нагрузки.

Соотношение (2.11) – (2.12) дополняются граничными условиями

$$u_i|_{S_u} = g_i(\mathbf{r}) \quad (2.14) \quad \sigma_i|_{S_\sigma} = \bar{f}_i(\mathbf{r}), \quad (2.15)$$

где S_u, S_σ – части поверхности тела, на которых заданы геометрические и силовые граничные условия;

g_i, \bar{f}_i – заданные вектор-функции перемещений и поверхностных нагрузок.

В случае контактного взаимодействия тел p, q с гладкими поверхностями на части поверхности S_c каждого тела добавляются условия непроникновения:

$$(u_v^p + u_v^q)|_{S_c} \leq \delta(\mathbf{r}), \quad (2.16)$$

где u_v – составляющая перемещения по нормали \mathbf{v} до поверхности;

δ – начальный зазор в сопряжении тел.

Как известно, начальная задача (2.10) – (2.16) приводится к вариационной задаче

$$(\bar{L}_M u_M, v_M) = (f_M, v_M), \quad \forall v_M, \quad (2.17)$$

где \bar{L}_M – оператор краевой задачи в середине области Ω ;

$(*,**)$ – соответствующая билинейная форма,

или вариационного неравенства

$$(\bar{L}_M u_M, v_M - u_M) \geq (f_M, v_M - u_M), \quad \forall v_M \in G, \quad (2.18)$$

где G – множество, задаваемое ограничениями (2.16).

Вариационная задача (2.17) или неравенство (2.18) приводятся к проблеме минимизации функционала $I(u_M)$:

$$I(u_M) = 1/2(\bar{L}u_M, u_M) - (f_M, u_M) \rightarrow \min. \quad (2.19)$$

Для случая (2.17) ищется безусловный минимум, а для случая (2.18) – минимум на множестве G в пространстве функций u_M . Данный квадратичный функционал состоит из квадратичной $a(u_M, u_M)$ и линейной $b(u_M)$ форм. При этом квадратичная форма в (2.19) является потенциальной энергией деформации исследуемой системы, а линейная – работой внешних сил. Например, для пространственной задачи теории упругости билинейная форма, порождающая квадратичную составляющую (2.19), имеет вид:

$$a(u_M, v_M) = (\bar{L}u_M, v_M) = \int_{(\Omega)} \sigma_{ij}(u_M) \varepsilon_{ij}(v_M) d\Omega, \quad (2.20)$$

а линейная –

$$b(u_M) = (f_M, u_M) = \int_{(S_u)} \bar{f}_i \cdot u_{M_i} dS + \int_{(\Omega)} \bar{f}_i \cdot u_{M_i} d\Omega. \quad (2.21)$$

Для определения напряженно-деформированного состояния тел исследуемой системы, то есть решения некоторой текущей задачи анализа, необходимо либо решить систему уравнений (2.11) – (2.15) (или неравенств (2.16) для случая контактного взаимодействия), или вариационное уравнение (2.17) (соответственно неравенство (2.18)), или провести минимизацию функционала (2.19).

При решении задачи определения напряженно-деформированного состояния предполагается, что она поставлена корректно (по Адамара). При этом кроме классических требований развязности, единственности и устойчивости, то есть:

$$\forall f_M \exists u_M : L_M(u_M, p_M, f_M, t) = 0, \quad (2.22)$$

$$[L_M(u_M^1) = 0, L_M(u_M^2)] = 0 \Rightarrow u_1 = u_2, \quad (2.23)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|f_M^\varepsilon - f_M\| = 0 \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|u_\varepsilon - u\| = 0, \quad (2.24)$$

где $\|\cdot\|$ – некоторая норма; u_ε – решение (2.10) для $f_M = f_M^\varepsilon$,

предполагается еще и требование устойчивости по отношению к изменению оператора \bar{L}_M (как структурное, так и параметрическое), а также граничных условий (2.14) – (2.15) и условий контактного непроникновения (2.16). Последние условия распространяются и на функции g_i, \bar{f}_i, δ в (2.14)–(2.16), и, соответственно, на поверхности S_u, S_σ, S_c . Соотношения (2.10)–(2.24) составляют математическую модель для определения напряженно-деформированного состояния тяжело нагруженных элементов машин.

Оператор \bar{L}_M исследуемой задачи действует как оператор \bar{L}_M в области Ω и характеризуется типом оператора, его структурой, физико-механическими характеристиками, определяемыми свойствами материала, а также физической размерностью области Ω . На границе действуют различные граничные условия, характеризующие тип краевых условий, внешние нагрузки, условия контактного взаимодействия. Кроме того, сама область Ω имеет некоторую форму и геометрические размеры. То же относится к границе S и ее составляющим.

Все указанные данные различной природы составляют множество обобщенных параметров математической модели исследуемых тяжело нагруженных элементов машин. Естественно, что при переходе от реального объекта к его математической модели, как отмечалось выше, предполагается некоторая погрешность. В соответствии с этим необходимо в разных случаях решать следующие типы задач: уточнение оператора краевой задачи (тип, структура); уточнение граничных условий; уточнение нагрузок (тип, величина, распределение); уточнение условий сообщения; уточнение формы, размеров, гладкости областей Ω, S .

Важно отметить, что комплексная математическая модель исследуемого состояния или физико-механического процесса в качестве обобщенных параметров содержит всю информацию также и о схеме, и о режимах технологического процесса. Таким образом, она встраивается без сужения возможностей в общую схему исследований.

Для численного решения задачи минимизации функционала (2.19) в настоящее время часто применяется метод Рунге с базисными кусочно-полиномиальными функциями – метод конечных элементов.

Метод конечных элементов, дополненный предложенным подходом, был использован для решения отдельных задач.

Для перехода к решению конкретных задач разработанные методы

должны быть реализованы в виде соответствующего программно-аппаратного комплекса (см. подразд. 2.3).

Там же получила математическую формулировку и решена задача обоснованного выбора параметров численных моделей изучаемых элементов и технологий по критериям прочности, жесткости и износостойкости.

2.3. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания

Существующая в настоящее время традиционная технология конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов сложных механических систем [15–17] (рис. 2.3) предполагает следующие этапы:

1. Описание геометрии исследуемого объекта.
2. Генерирование конечно-элементной модели (КЭМ), в том числе конечно-элементной сетки, на основе геометрической информации.

3. Определение напряженно-деформированного состояния, анализ прочностных, жесткостных характеристик с возможным последующим изменением конструктивных схем и параметров, а также дальнейшим выполнением этапа 1.

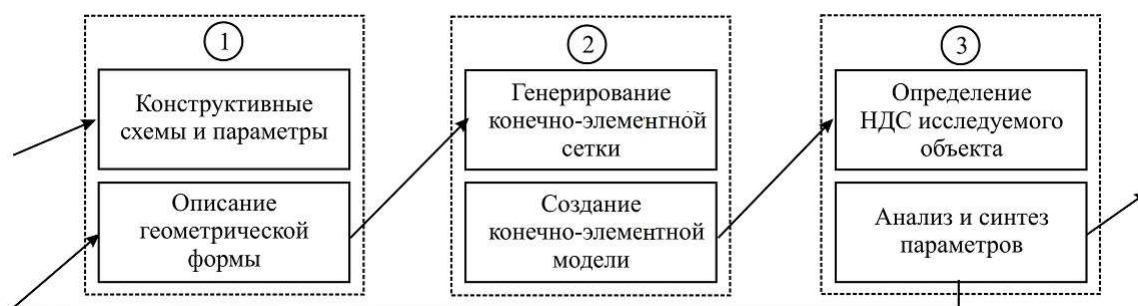


Рис. 2.3 – Традиционная схема конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций

Во многом данная схема исследований напряженно-деформированного состояния, встроенная в процесс проектирования машиностроительных конструкций, сохраняется и в среде автоматизированного проектирования, представленной в настоящее время совокупностью систем CAD/CAM/CAE. При этом происходит сложный направленный процесс оптимизации проектных решений в автоматизированном режиме, сопровождаемый генерацией, трансформацией и перестройкой моделей объекта (конструкторской, технологической и конечно-элементной формы описания проектируемой конструкции или ее частей). На рис. 2.4 приведена схема обмена информацией в различных форматах между системами автоматизированного проектирования.

Описанному здесь процессу проектирования, несмотря на высокую степень автоматизации и развитие средств моделирования, присущи определенные недостатки:

1. Цикл обратной связи ③→① (см. рис. 2.3), неизбежно присутствующий в том или ином виде в процессе оптимального синтеза элементов исследуемого объекта с учетом прочностных и жесткостных ограничений, требует, как правило, **перестройки** их КЭМ. Известно, что данный этап достаточно трудоемок (в силу высокой и постоянно возрастающей сложности вновь проектируемых объектов, а также условий их эксплуатации), и **ответственен** (поскольку качество КЭМ определяет точность моделирования НДС, характеристики которого часто оказывают решающее влияние на проектные решения).



Рис. 2.4 – Схема обмена информацией между различными САПР

2. Зачастую сетки конечных элементов **не регулируются** исследователем, а их генерация “отдается на откуп” специальным подсистемам – “мешерам”. Особенно это характерно для интегрированных CAD/CAM/CAE-систем, в которых управление конечно-элементной разбивкой часто осуществляется только путем установки характерных размеров генерируемых конечных элементов во всей области или отдельно по ее подобластям.

3. **Параметризация** конечно-элементной модели (в настоящем, глубоко значении этого слова) даже в системах высокого уровня (ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M) в силу высокой сложности этой задачи для общего случая произвольного объекта отсутствует, что прерывает попытки параметризации всего цикла исследований (см. рис. 2.3, 2.4).

4. Попытки создания **управляемых** разбивок наталкиваются на отсутствие, во-первых, автоматических универсальных процедур разбивки произвольных 3D областей на конечные элементы, а во-вторых, на потерю автоматизации и увеличении трудоемкости при создании управляемых разбивок, построенных вручную.

5. Ситуация усложняется при исследовании *сложнопрофильных 3D элементов* конструкций, когда уже сам этап описания геометрии настолько сложен, что об автоматизации, параметризации и управляемости сеток не может быть и речи, особенно для качественных призматических конечно-элементных моделей. Зачастую они просто исключают друг друга. На рис. 2.5 приведена схема, поясняющая соотношения таких сторон конечно-элементного моделирования как *управляемость, автоматизация, качество, параметричность* конечно-элементных моделей

6. Еще большую сложность и актуальность проблема приобретает при проектировании новых оригинальных конструкций, когда *изначально неизвестна* окончательная геометрия области, занимаемой исследуемым телом, или, что еще более усложняет задачу, когда геометрия определяется явно или неявно порождаемыми требованиями в ходе самого процесса проектирования.

7. Попытка создания "надстроек" над описанным процессом ситуацию только усугубляет, добавляя еще проблему *согласования* форматов данных с различными CAD/CAM/CAE-пакетами.

Анализ представленной на рис. 2.5 схемы, а именно *парных отношений* соответствующих характеристик, позволяет вскрыть присущие рассматриваемому процессу противоречия: попытка улучшить одну из характеристик модели, как правило, вступает в конфликт с требованием сохранить другую характеристику. Важно отметить, что, во-первых, *компромиссные* варианты при этом не дают удовлетворительного решения ни по одному из критериев, а во-вторых, даже при установлении приоритета одной из характеристик I-IV вступает в игру соответствующее ограничение I-IV (например, *автоматизация* процесса генерирования конечно-элементной модели сложной реальной конструкции может привести к такому возрастанию ее громоздкости, что возникнут проблемы с имеющимися в распоряжении исследователя вычислительными *ресурсами*; попытка *параметризации* модели, удобной проектировщику, обычно наталкивается на проблему *согласованности* геометрической модели и ее конечно-элементного представления, созданных в различных CAD и CAE или даже в разных CAD и CAE модулях одной системы; повышение *качества* создаваемой КЭМ обычно требует дополнительного ее совершенствования в режиме, только частично автоматизированном, а это сразу же сводит на нет *оперативность* процесса проектирования, который в современных условиях чрезвычайно уплотнен и ограничен во времени; *управляемость* создаваемых конечно-элементных моделей исследуемых объектов, которые, как

правило, обладают специфическими особенностями, требует специальных средств для описания свойств объекта и его КЭМ, что, в свою очередь, становится преградой для полного **интегрирования** модели в среду той или иной систем CAD/CAM/CAE).

Рассматриваемая проблема обостряется еще и следующими особенностями, а именно качественным отличием:

- природы и технологии оперирования с геометрической и негеометрической информацией, которые в конечном итоге соединяются в создаваемой конечно-элементной модели объекта;
- природы и механизмов оперирования с геометрической информацией в системах CAD и CAE.

Парадоксальность ситуации состоит в том, что наличие хотя бы одного “узкого места” тормозит весь процесс автоматизированного проектирования, осуществляемого в настоящее время чрезвычайно мощными CAD/CAM/CAE-системами. Автоматизация, управляемость, качество и параметричность конечно-элементного моделирования сложных 3D объектов как раз и является одним из таких “узких мест”, причем хронологически расположенным в средней части процесса проектирования, и притом, как правило, требующим проведения многовариантных расчетов с изменяемой моделью.

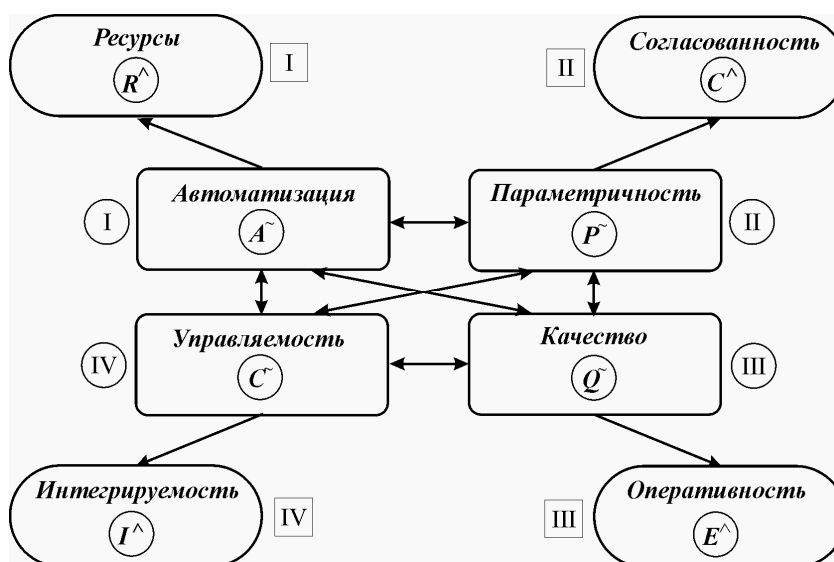


Рис. 2.5 – Качественные характеристики конечно-элементных моделей и соответствующие проблемные ограничения: I – автоматизация процесса создания КЭМ; II – параметричность КЭМ; III – качество КЭМ; IV – управляемость сеток КЭМ

Обратной стороной этой парадоксальной ситуации является то, что мощные системы CAD/CAM/CAE в последнее время усиленно развивают как раз свои универсальные инструменты. В то же время существующие бреши в некоторых узловых моментах автоматизации проектирования ос-

таются незакрытыми. В частности, одним из проблемных вопросов является именно узел генерации конечно-элементных моделей, удовлетворяющих комплексу (см. рис. 2.5) центральных критериев $\{P^{\sim} - A^{\sim} - C^{\sim} - Q^{\sim}\}$ и периферийных ограничений $\{E^{\wedge} - C^{\wedge} - R^{\wedge} - I^{\wedge}\}$.

Таким образом, комплексный всесторонний анализ ситуации позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время сложилась актуальная, важная и сложная задача разработки технологии конечно-элементного моделирования сложных механических объектов, характеризующейся соединением свойств *параметричности, автоматизации, управляемости и качества* (критерий $K^{\sim} = \{P^{\sim} - A^{\sim} - C^{\sim} - Q^{\sim}\}$, см. рис. 2.5) при обеспечении требований *оперативности* проектирования, *согласованности* форматов моделей ограничениям по вычислительным *ресурсам* и *интегрируемости* в среды систем CAD/CAM/CAE различного типа (критерий $K^{\wedge} = \{E^{\wedge} - C^{\wedge} - R^{\wedge} - I^{\wedge}\}$, см. рис. 2.5).

Ставится задача разработки технологии конечно-элементного моделирования, которая в сочетании с современными средствами в среде систем CAD/CAM/CAE обеспечивает удовлетворение комплексному критерию K^{\sim} и комплексному ограничению K^{\wedge} , что в конечном итоге ликвидирует проблемное “узкое место” в автоматизированном, интегрированном, качественном, параметрическом проектировании сложных конструкций с учетом их напряженно-деформированного состояния. Поскольку существующая система противоречий, описанных выше, делает поставленную задачу в общем случае неразрешимой внутренними средствами даже мощных современных систем CAD/CAM/CAE, требуется поиск новых путей ее решения. В связи с этим предлагается решать задачу не “извне” дополнением существующего инструментария автоматизированного проектирования, а “изнутри”, изменяя сам способ описания и создания моделей исследуемых объектов, в т.ч. их конечно-элементных моделей. С другой стороны, внедрение при этом в традиционную схему CAD/CAM/CAE-системы новых качеств предполагается осуществлять при помощи дополнительных модулей. Кроме того, поскольку существующие даже самые мощные универсальные системы автоматизированного проектирования (Pro/ENGINEER, CATIA, SolidWorks, ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M, LS-DYNA) не предоставляют способов решения поставленной задачи в общем случае, представляется целесообразным обойти эту проблему, предлагая *общий подход*, но реализуемый каждый раз для определенного класса исследуемых конструкций (т.е. вместо отсутствующего *универсального* инструмента предлагается реально осуществимая *технология*, характери-

зующая общими приемами при работе с **конкретными** объектами).

Для решения поставленной задачи предлагается привлечь метод обобщенного параметрического описания элементов сложных механических систем [1]. При его использовании для описания того или иного класса конструкций формируется обобщенное параметрическое пространство P , представляющее собой объединение множеств P_G, P_T, P_F :

$$P = P_G \cup P_T \cup P_F, \quad (2.25)$$

где P_G, P_T, P_F – множество обобщенных параметров, однозначно и непротиворечиво описывающие геометрические, технологические и конечно-элементные модели исследуемых объектов (рис. 2.6).

Сами множества P_G, P_T, P_F состоят из элементов, от которых требуется следующее:

$$G = G(p), T = T(p), F = F(p) \quad \forall p \in P \quad (2.26)$$

являются однозначными отображениями из множества P в множества моделей G, T, F (см. рис. 2.6). Данное отображение не является во всех случаях математически строго формализуемым. Но это свойство, вообще говоря, в рамках предложенного подхода и не требуется.

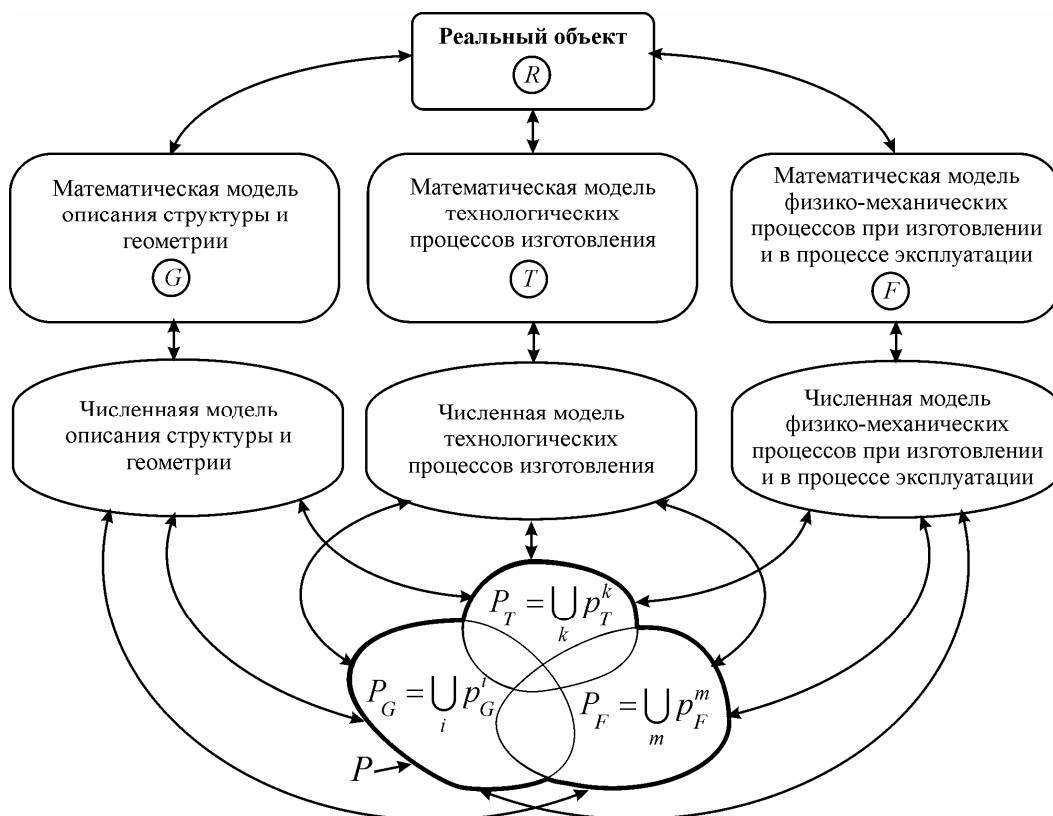


Рис. 2.6 – Формирование обобщенного параметрического пространства, описывающего исследуемый объект или класс объектов

Коль скоро формализация соотношения (2.26) порождает в общем случае значительные сложности, то предлагается, чтобы это отображение всего лишь было однозначным, алгоритмизируемым и корректным:

$$\forall p \in P \exists \{G, T, F\}: G = G(p), T = T(p), F = F(p), \quad (2.27)$$

$$[\{G_1, T_1, F_1\} = \{G_2, T_2, F_2\}] \Rightarrow p_1 = p_2, \quad (2.28)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|p_\varepsilon - p\| = 0 \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|\{G_\varepsilon, T_\varepsilon, F_\varepsilon\} - \{G, T, F\}\|^* = 0, \quad (2.29)$$

где $\|\bullet\|$ – некоторая норма; $\|\bullet\|^*$ – некоторая псевдонорма.

В пространстве обобщенных параметров каждый элемент представляет собой объект любой природы: число, структура, функция, распределение, множество. В связи с этим фигурирующее в (2.29) понятие нормы требует конкретизации в зависимости от набора параметров, составляющих данное множество. Соответственно, требуется и уточнение понятия псевдонорма по отношению к описываемым моделям (в данном случае требуется только оценка “близости” моделей G, T, F).

Расставив таким образом акценты, можно формализовать процесс работы с обобщенными параметрами, распространив на них традиционный инструментарий параметрического анализа и синтеза.

Кроме того, само существование соотношений (2.26), описывающих комплекс моделей $M = \{G, T, F\}$, не решает поставленную задачу. Необходимо разработать, учитывая сложность формализации (2.26), **технологии** реализации соответствия $p \rightarrow M$:

$$M = M(p). \quad (2.30)$$

Возникающая проблема обладает только кажущейся простотой. В действительности именно разнородность обобщенных параметров p и неформализуемость соотношений (2.26), (2.30) представляют в процессе исследований основные препятствия для их интенсификации на основе автоматизации при сохранении параметричности.

Нужно отметить, что многие системы CAD/CAM/CAE имеют широкий арсенал автоматизации многих этапов проектирования отдельных видов конструкций (например, модули автоматизированного проектирования элементов технологической оснастки, двигателей внутреннего сгорания и т.д.). В то же

время множество элементов p в данном случае заранее ограничивается определенным кругом, выход за который сопряжен с потерей автоматизации, параметричности и т.д. Однако именно этот способ можно взять за прототип при алгоритмизации технологии генерирования комплекса моделей M по набору обобщенных параметров.

На рис. 2.7 представлена схема функционирования такой технологии моделирования.

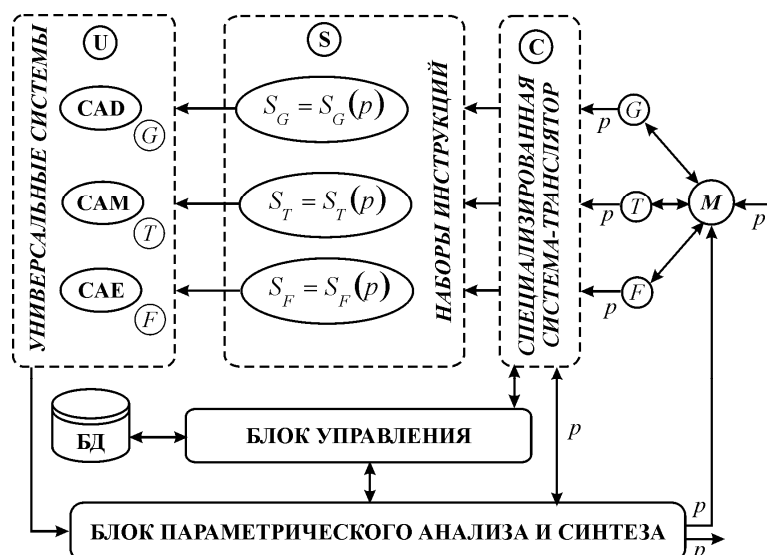


Рис.2.7 – Автоматизация этапов моделирования на основе обобщенного параметрического подхода и специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем

Особенность данной технологии состоит в том, что между комплексом математических моделей $M = \{G, T, F\}$ и универсальными системами CAD/CAM/CAE помещается специализированная система-транслятор, которая для конкретного класса объектов реализует перевод соотношений (2.26), (2.30) в наборы инструкций $S_G = S_G(p)$, $S_T = S_T(p)$, $S_F = S_F(p)$ в формате

универсальных систем CAD/CAM/CAE. Это позволяет использовать на этапе моделирования всю мощь современных САПР, после чего проводить параметрический анализ и синтез. Соответствующий блок управления и специализированная база данных предоставляют возможность не только координировать информационные потоки в процессе автоматизированного проектирования, но и организовывать получаемые данные в структуры, пригодные для специализированных баз знаний и экспертных систем.

Естественно, что предложенная технология по охвату существенно шире исходно поставленной задачи автоматизированного конечно-элементного моделирования. Однако именно в ее рамках создаются замкнутые информационные потоки, которые, как следует из рис. 2.6, между отдельными подсистемами являются взаимопересекающимися.

Таким образом, чтобы ликвидировать “узкое место” автоматизации конечно-элементного моделирования, пришлось построить *технология* автоматизации всего процесса моделирования, сузив при этом охват объектов до конкретного их типа. В то же время этот недостаток является не таким

существенным, поскольку изменение объекта моделирования требует только переработки специализированной системы-транслятора C (см. рис. 2.7). В обмен на это появляется возможность разрешения парных противоречий в “четыреугольнике” “ $P^{\sim} - A^{\sim} - C^{\sim} - Q^{\sim}$ ”, а также удовлетворения ограничений “ $E^{\wedge} - C^{\wedge} - R^{\wedge} - I^{\wedge}$ ”. Это, в свою очередь, позволяет заключить, что исходная задача – “ $K^{\sim} + K^{\wedge}$ ” получила свое решение в общем виде.

Если не учитывать “технологическую” компоненту комплекса генерируемых моделей исследуемых объектов, то алгоритм параметрического синтеза некоторой конструкции с учетом прочностных и жесткостных ограничений можно изобразить в виде, представленном на рис. 2.8.

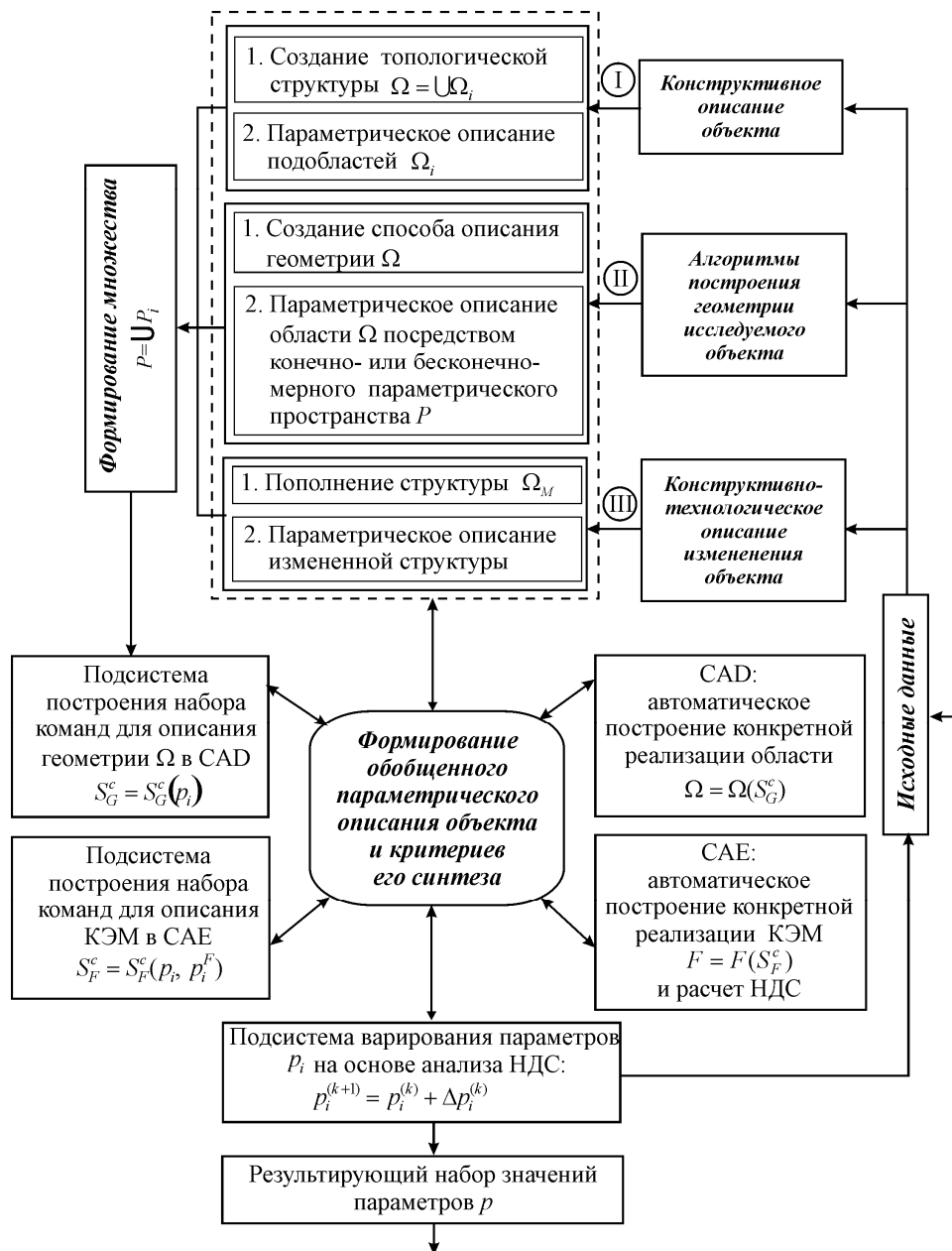


Рис. 2.8 – Структура системы автоматизированного генерирования моделей исследуемых объектов

В данном случае рассмотрены 3 варианта:

I. Область Ω , занимаемая исследуемым телом, в которой действует оператор L начально-краевой задачи

$$L(u, p, r, t) = 0, \quad (2.31)$$

где u – переменные состояния, r, t – пространственные и временная координаты, представляют собой сложную, но заранее задаваемую область.

При этом Ω можно представить в виде

$$\Omega = \bigcup_s \Omega_s, \quad (2.32)$$

где подобласти Ω_s – такие, что позволяют проводить их разбивку на конечные элементы параметрическим образом. Тогда решение задачи автоматизации представляется последовательностью этапов разбивки области Ω на подобласти Ω_s , а подмножества параметров \bar{p}_F , описывающих конечно-элементную модель, – в виде объединения подмножеств \bar{p}_F^s :

$$\bar{p}_F = \bigcup_s \bar{p}_F^s. \quad (2.33)$$

Основная сложность при этом состоит в одновременном удовлетворении непротиворечивости (2.32) и бесконфликтности (2.33).

II. Область Ω представляет собой варьируемый обобщенный параметр, определяемый в результате решения некоторой дополнительной задачи:

$$L_1|_{\Omega}(u, p, r, t) = 0; \quad (2.34) \quad \left| \quad L_2|_{\bar{\Omega}}(\Omega, p, r, t) = 0, \quad (2.35)$$

где L_1 – оператор, аналогичный (2.31); L_2 – оператор вспомогательной задачи, действующий в области $\bar{\Omega}$.

Поскольку в общем случае система уравнений может быть связанной, то получаемая нелинейная система требует значительно больших ресурсов для ее решения.

В таком случае затруднена не только разбивка области Ω в параметрическом виде и автоматическом режиме, но и само описание этой области достаточно сложно (получается обычно численно как результат итерационного решения системы уравнений (2.34)-(2.35)).

Однако в отдельных случаях, в силу специфики уравнений (2.35), областей Ω и $\bar{\Omega}$, этот недостаток может быть обращен в положительное качество, определяя естественный способ конечно-элементного моделирования исследуемых объектов.

III. Область Ω предполагается изменить (например, в случае модернизации, реконструкции, ремонта или на этапе доработки конструкции по

итогам полигонных испытаний):

$$\Omega_m = \Omega / \Omega^* \cup \Omega^{**}, \quad (2.36)$$

где Ω^* – удаляемые части объекта; Ω^{**} – добавляемые элементы объекта.

В этом случае обобщенными параметрами являются Ω^* , Ω^{**} . Обычно в процессе исследований требуется решить некоторую оптимизационную задачу

$$I(p) \rightarrow \min, \quad p \in k, \quad (2.37)$$

где I – некоторая целевая функция; k – множество ограничений (I, k задаются в обобщенном параметрическом пространстве, включающем и Ω^* , Ω^{**}).

Таким образом, в работе предложена новая технология автоматизации процесса построения параметрических, управляемых, качественных конечно-элементных моделей сложных конструкций и технологий упрочнения тяжелонагруженных элементов машин как составного элемента всего цикла проектных и технологических работ. Процесс создания КЭМ выполняется, также как и остальные этапы, в автоматизированном режиме и с поддержкой принятых в том или ином случае форматов хранения и передачи данных. Это составляет решение актуальной и важной задачи создания технологии автоматизации всего комплекса проектных и исследовательских работ с моделированием напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных и ответственных элементов машиностроительных конструкций, а также схем их упрочнения.

Можно утверждать, что предложенные принципиально новая математическая модель обобщенного параметрического описания элементов сложных механических систем, новая структура специализированных интегрированных систем их автоматизированного проектирования, исследования и изготовления, а также технология создания параметрических конечно-элементных моделей исследуемых объектов. В отличие от традиционных технологий организации процессов «проектирование – исследования – технологическая подготовка производства – эксплуатация – ремонт – упрочнение – реконструкция – модернизация – утилизация», все типы моделей и задач в данном случае формируются и решаются в едином обобщенном параметрическом пространстве. Это позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая технология исследования дает возможность организации открытой архитектуры для всех типов моделей, САПР, комплексов экспериментальных исследований и так далее, то есть обеспечивается единая база и технология оперирования всеми информационными потоками при проектировании в максимально автоматизированном, управляемом режиме с непротиворечивыми связями и со сбалансированным уровнем требований к ресурсам.

Именно чрезвычайная гибкость и перенастраиваемость предложенного в работе подхода позволяет охватывать целые классы конструкций и технологий в ходе исследований, встраиваемые в процесс проектирования и технологической подготовки производства новых изделий, а также ремонта и упрочнения с применением современных средств автоматизации – систем CAD/CAM/CAE/PDM.

Предложенный подход реализован в виде специализированных программно-модельных комплексов для автоматизированного проектирования, исследования напряженно-деформированного состояния, изготовления и упрочнения сложных машиностроительных конструкций. Он действует в виде программно-аппаратного комплекса «Тензор» для анализа и синтеза моделей элементов сложных механических систем, который состоит из программного обеспечения и компьютерного кластера.

Созданный уникальный мощный инструмент компьютерного моделирования – программно-аппаратный комплекс с кластером «Политехник-125» в центре «Тензор» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» был использован для решения множества прикладных задач. На его базе проведены все исследования с привлечением программно-аппаратных средств компьютерного моделирования сложных систем и технологий, в том числе – для различных методов упрочнения.

Литература к разделу 2

1. Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной, Е.А. Орлов, Н.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. Наук.-техн. журнал. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №1. – С. 57-79.

2. Ткачук Н.А. Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурной, Г.Д. Гриценко, Е.А. Орлов, С.Т. Бруль // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганск : 2007. – №9(115), част. 1. – С. 196-205.

3. Рикунев О.Н. Специализированные программно-модельные комплексы для анализа динамических процессов / О.Н. Рикунев, А.В. Набоков, И.В. Мазур, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. Наук.-техн. журнал. – Х. : НТУ "ХПІ", 2014. – № 1. – С. 123-127.

4. Ткачук Н.Н. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ

применимости / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Научно-техн. и производств. журнал. – Москва: ООО "Тисо Принт", 2014. – №6. – С. 10–16.

5. Ткачук Н.Н. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (продолжение) / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Научно-техн. и производств. журнал. – Москва: ООО "Тисо Принт", 2014. – №7. – С. 11-20.

6. Ткачук Н.Н. Многоуровневые модели в задаче анализа контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: алгоритмы, реализация и анализ применимости (окончание) Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Научно-техн. и производств. журнал. – Москва: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 8. – С. 6-8.

7. Гриценко Г.Д. Применение специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических конструкций: определение напряженно-деформированного состояния и обоснование параметров / Г.Д. Гриценко, А.В. Ткачук, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко, С.Т. Бруль, А.В. Литвиненко // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Х. : НТУ "ХПІ", 2008. – №14. – С. 17-25.

8. Ткачук Н.А. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Е.В. Глущенко, А.В. Ткачук // Механіка та машинобудування. Наук.-техн. журнал. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – № 2, т. 2. – С. 85-96.

9. Чепурной А.Д. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров элементов машиностроительных конструкций / А.Д. Чепурной, Г.П. Глинин, Ю.Б. Гусев, М.М. Пеклич, Е.Н. Барчан, Н.А. Ткачук // Вестник НТУ „ХПИ”. Сб. науч. трудов. Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Х. : НТУ "ХПИ", 2005. –№53. – С. 162-176.

10. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное обоснование параметров численных моделей элементов механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Н. Ткачук, А.В. Бондаренко, С.Т. Бруль, А.В. Литвиненко // Вісник НТУ “ХПІ”. Зб. наук. праць. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Х. : НТУ "ХПІ", 2008. – №14. – С. 117-125.

11. Чепурной А.Д. Общий подход к обоснованию параметров проек-

тируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей / А.Д. Чепурной, Г.П. Глинин, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. Наук.-техн. журнал. –Х. : НТУ "ХПІ", 2009. –№2. – С. 103-108.

12. Карапейчик И.Н. Многоуровневые гибридные расчетно-экспериментальные модели для синтеза параметров элементов специальных транспортных средств / И.Н. Карапейчик, А.Д. Чепурной, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. Наук.-техн. журнал. – Х. : НТУ "ХПІ", 2011. – №2. – С. 113–119.

13. Ткачук Н.А. Экспериментальные исследования корпусов легкобронированных машин / Н.А. Ткачук, И.Н. Карапейчик, А.В. Литвиненко // Вісник СевНТУ. Зб. наук. праць. Випуск 133/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – С. 37-43.

14. Ткачук Н.Н. Расчетно-экспериментальная идентификация математических и численных моделей элементов сложных механических систем / Н.Н. Ткачук, А.Д. Чепурной, Н.Б. Скрипченко, А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Научно-техн. и производств. журнал. – Москва: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 2. – С. 3-9.

15. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

16. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Sixth Edition – Butterworth-Heinemann, 2005. – 752 pp.

17. Belytschko T., Liu W.K. and Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures – New York: J. Wiley & Sons. – 2000. – 600 pp.

РАЗДЕЛ 3

ДИСКРЕТНОЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

В данном разделе рассматривается новая идея дискретного упрочнения, способ ее реализации, методика и результаты исследований структуры и свойств дискретного упрочнения и основного материала детали, следуя материалам работ [1–5].

3.1. Физико-химическая сущность процесса электроискровой обработки

Электроискровая обработка (ЭИО) характеризуется комплексом уникальных преимуществ:

- простота технологии, не требующей вакуума или специальной среды;
- низкая энергоемкость (менее 1 кВт);
- отсутствие разогрева изделия на большую глубину, что обеспечивает сохранение свойств сердцевины, полученных в процессе предварительной термической (химико-термической) обработки;
- большая сила сцепления нанесенного металла с основой;
- небольшие габариты оборудования;
- экологическая безопасность.

Сущность метода ЭИО заключается в переносе металла с анода на катод (обрабатываемое изделие) в момент искрового разряда между ними. Это приводит к изменению химического состава и физико-механических свойств материала основы в пятне разряда. При соответствующем подборе электрода и условий ЭИО достигается упрочнение обработанной поверхности. Осуществляя разряды в отдельных местах изделия, обеспечивают дискретное упрочнение.

Несмотря на кратковременность искровых разрядов (10^{-6} – 10^{-3} с), ЭИО является сложным процессом, включающим ряд физико-химических явлений, связанных друг с другом и протекающих одновременно. Обобщенная модель процесса ЭИО описывает закономерности таких основополагающих явлений как эрозия электродов, формирование на них модифицированных слоев, их взаимосвязь.

В соответствии с этой моделью, искровой разряд, создающий плазменный шнур с температурой $3\text{--}7\cdot 10^3$ К, производит термомеханическое воздействие на поверхность электродов. В местах формирования анодных и катодных пятен разряда образуются объемные источники теплоты, приводящие к появлению эрозионных лунок. В лунках можно выделить три зоны

– испарения, плавления и возникновения напряженного состояния. Размер первых двух зон определяется, в основном, тепловой составляющей искрового разряда и увеличивается со снижением температур плавления и кипения, а также коэффициента теплопроводности материала. Зона же напряженного состояния является следствием волны термического и термомеханического напряжения в результате импульсного нагрева, реактивного воздействия плазмы и ее расширения в момент спада тока в импульсе.

Детальные исследования ЭИО, в том числе механизма искрового разряда, до 60-х годов XX столетия сдерживались отсутствием способов изучения процессов длительностью 10^{-8} – 10^{-9} с. Прорыв в технике регистрации наносекундных процессов, который произошел в 60-х годах, позволил исследовать некоторые детали механизма электрического разряда. Было установлено явление взрывоподобной электронной эмиссии при электрическом пробое межэлектродного промежутка. При сближении двух электродов между ними нарастает плотность электрического поля. На выступах образуется градиент напряженности, где электрическое поле локально усиливается в 10–100 раз, достигая величин 10^5 – 10^6 Вт·см⁻¹ и более. Такие участки являются источниками автоэлектронной эмиссии, плотность тока которой может возрасти до 10^9 А·см⁻² и выше. Это приводит к быстрому разогреву поверхности, реализуется микровзрыв в жидко-паровой фазе, следствием которого является взрывоподобная электронная эмиссия, то есть испускание электрического тока с поверхности. Дальнейшая эмиссия электронов осуществляется в виде эктонов – лавинообразных порций автоэлектронов в количестве 10^{11} – 10^{12} и обычно продолжается в течение 10^{-9} – 10^{-8} с, а затем прекращается вследствие расширения области эмиссии, теплоотвода вглубь материала, выноса тепла за пределы этой области, испарения и выброса жидкого металла.

Кроме тока автоэлектронной эмиссии с микровыступов, микровзрыв и возбуждение взрывоподобной электронной эмиссии может возникнуть и по другим причинам: при ударе о поверхность осколка ускоренного материала, при действии пучка заряженных или нейтральных частиц, например, ионов, и т. д.

Описанные процессы развиваются на поверхности обоих электродов. Поскольку при ЭИО деталь является катодом, остановимся более подробно на изменениях именно на этом электроде.

Массоперенос продуктов электроэрозии с анода на катод характеризуют коэффициентом массопереноса K , который представляет собой отношение величины суммарного прироста катода $\sum \Delta k$ к суммарной эрозии анода $\sum \Delta a$ за время обработки t

$$K_t = \Sigma \Delta k / \Sigma \Delta a.$$

Максимальная величина коэффициента массопереноса является одним из условий эффективности процесса ЭИО. Если при разряде масса катода уменьшается, это означает, что происходит распыление катода (поверхности детали), а не осаждение материала, перенесенного с анода. Такая ситуация реализуется при ЭИО легкоплавких металлов, в том числе алюминия, традиционными электродными материалами – тугоплавкими металлическими сплавами и композитами системы “металлоподобное тугоплавкое соединение – металлическая связка”. Максимальный коэффициент массопереноса K_t достигается при использовании в качестве анода сталей и титановых сплавов – 60–90 %.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что существующая на сегодня физико-химическая модель процесса ЭИО достаточно схематична, и ее разработка пока еще далека от своего завершения. Ее основные положения были сформулированы на основе исследований систем «металл–металл». Гораздо реже встречаются работы, в которых в качестве анода использованы системы «металл–керамика».

Учитывая постоянно растущий интерес науки и промышленности к использованию износостойких и коррозионностойких керамических и металлокерамических материалов, а также перспективность метода ЭИО в нынешних экономических, энергетических и экологических реалиях, дальнейшее исследование явлений, связанных с массопереносом при электроискровом разряде, безусловно, является необходимым и актуальным.

3.2. Факторы, влияющие на процесс электроискровой обработки, получаемую структуру и свойства

Среди основных факторов, определяющих эффективность процесса ЭИО и свойства деталей, подвергнутых этой обработке, можно назвать следующие:

- материал анода;
- состав межэлектродной среды;
- характер структуры, образующейся в зоне разряда.

Физико-химические критерии выбора электродных материалов.

Электродные материалы классифицируют по разным критериям: по типу химической связи, назначению созданного упрочненного слоя, физико-химической природе материала, его прочности. Эффективность массопереноса в большой степени определяется ковалентностью химической связи.

Характеристикой ковалентности является критерий направленности связи α^* , характеризующий сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций. По этому критерию электродные материалы подразделяются на две группы: со слабой направленностью межатомных связей

($\alpha^* \leq 1$) и с высокой степенью ковалентности ($\alpha^* > 1$).

В первую группу входят, в основном, металлы, которые, в свою очередь, подразделяются:

- по типу твердого раствора, образующегося при взаимодействии с материалом катода (неограниченный или ограниченный);
- по температуре хладноломкости (выше или ниже 20 °С).

Ко второй группе материалов относятся графит, интерметаллиды и тугоплавкие соединения.

Как отмечалось ранее, для систем «металл–металл» прежде всего обращается внимание на коэффициент переноса материала с анода на катод. Для стальных (чугунных) деталей чаще всего выбирают стальной анод. Естественно, что в каждом конкретном случае материал анода может изменяться в зависимости от состава материала изделия, условий эксплуатации и требований к свойствам его поверхности. При этом учитывается соотношение теплофизических констант электродов (теплопроводность, температура плавления). Однако существует и ряд общих рекомендаций. Прежде всего, это обеспечение высокой адгезии нанесенного материала к основе и трещиностойкости, что достигается при образовании между материалами анода и катода ограниченных твердых растворов или интерметаллидов с низкой температурой хладноломкости.

Для металлокерамических и керамических электродов большое значение имеет пористость. В общем случае эрозия материала легирующего электрода возрастает с увеличением пористости.

Состав межэлектродной среды. Состав существенно влияет на процесс ЭИО. В отличие от легирования в инертных газах, в химически активных средах (воздушной, азот- и углеродсодержащей) продукты электроэрозии взаимодействуют в жидко-паровой и твердой фазах с элементами среды. Высокая температура плазмы ($5 \cdot 10^3$ – 10^4 °С) ускоряет процесс их взаимодействия. В результате, несмотря на кратковременность разряда, ЭИО сопровождается образованием различного рода химических соединений.

Если процесс ведется в воздушной среде, то это, главным образом, различные оксиды и в меньшем количестве – нитридные фазы. Такие соединения формируются в первую очередь по границам зерен, что увеличивает склонность к хрупкому разрушению и повышает порог хладноломкости.

Для предотвращения появления оксидов и нитридов и улучшения свойств поверхности детали иногда процесс ЭИО проводят с введением в зону разряда самофлюсующихся и стабилизирующих искровой разряд добавок, а также микролегирующих элементов.

Характер структуры, образующейся в зоне разряда. Этот вопрос яв-

ляется наименее изученным. Общим явлением можно назвать ожидаемое измельчение зерна в зоне оплавления в связи с кратковременностью процесса и сверхвысокой скоростью охлаждения. Конкретная же структура в области разряда зависит и от состава материалов электродов (анода и детали), и от режима ЭИО.

Цикл работы электрической системы, генерирующей искровые импульсы, может быть условно выражен соотношением

$$T=t_{\text{п}}+t_{\text{с}}+t_{\text{р}}+t_{\text{в}},$$

где T – общее время цикла; $t_{\text{п}}$ – подготовительное время; $t_{\text{с}}$ – время образования канала сквозной проходимости; $t_{\text{р}}$ – рабочее время, когда система отдает накопленную энергию и, как следствие, происходит выброс материала анода; $t_{\text{в}}$ – время, за которое система восстанавливает электрическую прочность.

Слой, созданный ЭИО, формируется в течение времени $t_{\text{р}}$. Остальные составляющие ($t_{\text{п}}$, $t_{\text{с}}$, $t_{\text{в}}$) необходимы для восстановления системы к новому импульсу. Таким образом, способ по своей сути является дискретным, и в этом его преимущество, поскольку:

- единичный электроискровой разряд обеспечивает стабильность физико-механических свойств отдельного пятна;
- изменение величины тока разряда $I_{\text{р}}$ позволяет регулировать геометрию лунки и глубину проникновения в основу легирующих элементов;
- управляя частотой импульсов или скоростью относительного перемещения анода и катода, можно варьировать количество дискретных областей, упрочненных ЭИО, на рабочей поверхности детали.

При разработке процесса ЭИО следует учитывать и некоторые его недостатки:

- толщина наносимого слоя и глубина легирования ограничены;
- обработанная поверхность имеет большую шероховатость;
- производительность процесса невысока;
- на поверхности возможно формирование каверн.

Вследствие этого до настоящего времени ЭИО не нашла широкого распространения в машиностроении и ограничивалась отдельными попытками повышения износостойкости инструмента и деталей из конструкционных сталей, бронз и чугунов, если к качеству поверхности изделия не предъявлялись высокие требования.

3.3. Научно-техническое обоснование нового способа дискретного упрочнения

Рассматриваемый в данном разделе способ дискретного электроискрового упрочнения (ДЭУ) отличается от описанной выше ЭИО тем, что

электроразряд осуществляется при соприкосновении анода с деталью. Иными словами, процесс включает элементы точечной сварки. В результате обеспечивается упрочнение поверхностей трения и улучшение триботехнических характеристик.

Анод выполнен в виде диска определенной толщины. Перемещая его относительно обрабатываемой поверхности, получают упрочненные участки в виде расположенных на определенном расстоянии островков или линий произвольной конфигурации (рис. 3.1).

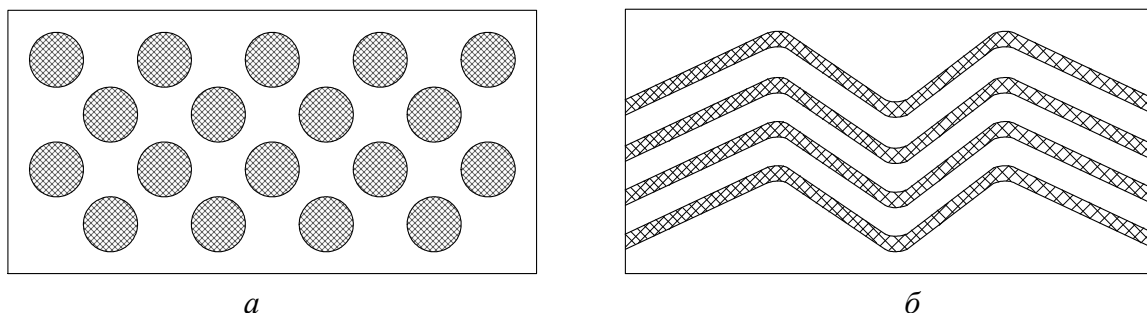


Рис. 3.1 – Разновидности дискретных покрытий (схема): *а* – островковое; *б* – линейное

В данной работе использована схема островкового упрочнения. Дискретное покрытие состоит из двух частей: верхний приращенный слой, находящийся над поверхностью детали, и слой, расположенный под ее поверхностью (рис. 3.2, см. цветн. вклейку).

Перенесенный материал перемешивается с основным. В процессе последующего резкого охлаждения в большинстве случаев (если анодом является металл) формируются пересыщенные твердые растворы с вкраплениями мелкодисперсных избыточных фаз. Совершенно естественно, что эти зоны отличаются механическими свойствами, в частности, твердостью, от металла основы. При этом поверхность приращенной зоны – неровная, представляет собой чередующиеся острые выступы и впадины (каверны), являющиеся концентраторами напряжений.

После завершения нанесения дискретного покрытия определяют максимальный прирост над поверхностью Δ_{\max} , максимальную глубину каверн C_{\max} и рассчитывают припуск h из условия удаления каверн

$$h \geq C_{\max} + \Delta_{\max}.$$

На рис. 3.3, *а* (см. цветн. вклейку) приведена схема шлифования поверхности, а на рис. 3.3, *б* (см. цветн. вклейку) – ее вид после ДЭУ.

При срезе внешнего слоя на величину, несколько меньшую максимальной глубины каверны, на поверхности допускается сохранение неглубоких впадин (рис. 3.4). Они являются емкостями для масла, за счет чего уменьшается коэффициент трения в начальный момент взаимного смеще-

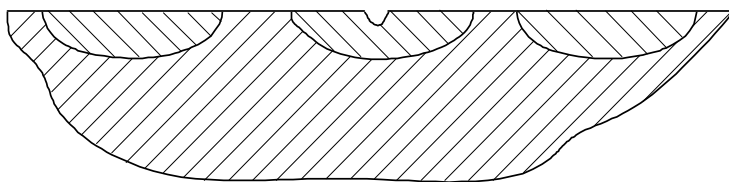


Рис. 3.4 – Поверхность после шлифования при неполном удалении каверн (схема)

ния контактирующих деталей.

Описанный способ ДЭУ обладает достаточно высокой производительностью, обеспечивает ста-

бильность процесса и позволяет управлять величиной дискретности.

3.4. Материалы, оборудование, технологическая оснастка и электроды для дискретного электроискрового упрочнения коленчатых валов

Исследования проведены на материалах, используемых в современной технике для изготовления коленчатых валов: сталь 42ХМФА (ГОСТ 4543–88), применяемая, например, для коленчатых валов автомобилей КамАЗ, и высокопрочный легированный чугун с шаровидным графитом, модифицированный магнием (ТУ Д70.05.Дт:1978), из которого изготавливают коленчатые валы двигателей типа Д80 для маневровых и магистральных тепловозов.

По существующей технологии стальные валы подвергают объемной закалке с высоким отпуском (улучшению), а после этого шейки упрочняют поверхностной закалкой или (чаще) азотированием. Чугунные валы проходят нормализацию с высоким отпуском, а шейки иногда дополнительно упрочняют закалкой с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) с последующим низким отпуском.

За базовую модель для дискретного упрочнения была принята установка «Дискрет-04», разработанная в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины на основе установки ЭФИ-25М с дисковым электрододержателем. Однако, эта установка предназначалась для нанесения дискретных покрытий толщиной не менее 0,3 мм, что сопровождалось образованием глубоких каверн. Для валов величина эрозии поверхности имеет большое значение. Для ее уменьшения установка оснащена специальным блоком управления, который существенно снижает возможность образования каверн на поверхности детали. Это позволяет уменьшить припуск на механическую обработку и, как следствие, увеличить глубину легированного упрочненного слоя.

ДЭУ выполняется на токарных станках после получистового шлифования шеек. Созданная универсальная технологическая оснастка позволяет с одной установки коленчатого вала обработать как коренные, так и шатунные шейки.

Известно, что все без исключения токопроводящие материалы при разряде переносятся с анода на катод. Как уже отмечалось, на эрозию анода

заметно влияют его теплофизические характеристики – температура плавления и теплота сублимации. Поэтому эффективность упрочнения существенно зависит от материала электродов.

Активность перенесения материалов при разряде можно расположить в такой ряд:



Прирост (наращивание) материала катода в пятне разряда определяется количеством перенесенного материала анода. Глубина упрочненного слоя зависит от растворимости материала анода в материале катода. Поэтому в общем случае чем выше растворимость, тем больше глубина легированного слоя, хотя на этот параметр очень существенно влияет режим обработки.

При разработке режимов и выборе электрода руководствуются следующими общими соображениями:

- необходимо одновременно достичь высоких значений износостойкости, усталостной прочности, трещиностойкости, пластичности, ударной вязкости, низкого коэффициента трения;
- уменьшить возможность попадания абразивных частиц в пару трения или обеспечить их измельчение в процессе работы, что облегчит их вынос из зоны трения смазочно-охлаждающей жидкостью;
- получить максимальную глубину легированного слоя;
- по возможности повысить теплостойкость поверхности трения, снизить влияние окружающей среды и масла на физико-механические свойства материалов поверхностей трения;
- материал электрода должен быть доступным для приобретения и относительно недорогим.

После проведения анализа возможных материалов электрода, которые могут обеспечить изложенные требования, для опробования были выбраны:

- нержавеющая сталь 08X18H10T (ГОСТ 5632-72);
- быстрорежущая сталь Р6М5 (ГОСТ 19265-73);
- подшипниковая сталь ШХ15 (ГОСТ 801-78).

3.5. Методика экспериментальных исследований

Для изучения структуры поверхности образцов с дискретно упрочненными зонами использовали стереоскопический микроскоп МВД-10 с увеличением от 3 до 150 раз. Определение толщины упрочненных слоев выполняли на микроскопах МИМ-7 и МПБ-2 при увеличении до 100 раз.

Для металлографических исследований использовали поперечные и продольные шлифы образцов, подвергнутых дискретному упрочнению. При полировании применяли алмазные пасты марок АСМ и АСН с номерами

зернистости 60/40, 40/28, 14/10, 9/5, 3/2, 1/0 по ГОСТ 25593-83. Полученные шлифы исследовали в нетравленном состоянии и после травления в 5%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе Неофот-21 в диапазоне увеличений от 100 до 600 раз.

Для изучения микроструктуры при больших увеличениях был использован растровый электронный микроскоп РЭМ-106 SELMI с высоким разрешением: в режиме высокого вакуума – 4 нм, низкого вакуума – 6 нм.

Микротвердость упрочненных зон измеряли с помощью твердомера ПМТ-3 алмазной пирамидой с углом при вершине 136° при нагрузке 0,2 Н.

Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов проводили на рентгеновской установке УРС-55 в камере Дебая с диаметром 57,3 мм в излучении трубки с железным анодом методом съемки рентгенограмм от «шлифа». Режим съемки: сила тока $I = 14$ мА, напряжение $U = 30$ кВ, время экспозиции – 50 минут. Кроме того, был использован дифрактометр ДРОН-3, на котором были получены профили дифракционных максимумов. Профили строили по точкам через интервал $2\theta = 0,1^\circ$ на фоне и через $0,02^\circ$ на максимуме. Съемку осуществляли в фильтрованном Cu-K_α излучении.

Распределение легирующих элементов в упрочненных образцах изучали с помощью рентгеновского микроанализатора MAP-3, а также с использованием специальной приставки к электронному микроскопу РЭМ-106. Рентгеновское излучение, возбуждаемое электронами с энергией до 50 кэВ, фокусировалось в пятно диаметром ~ 1 мкм. При исследовании постоянно регистрировались две характеристики: длина волны рентгеновского излучения и его интенсивность. Это давало возможность определить тип элемента и его количество.

Использованный исследовательский комплекс полностью компьютеризирован, что позволило проводить исследования в автоматическом режиме, включая математическую обработку полученных результатов.

Триботехнические характеристики определялись на машинах трения СНЦ-2 и СМТ-1 с целью оценки износостойкости, изнашивающей способности исследуемых материалов по отношению к контр-телу, изменения коэффициентов трения от нагрузки при ступенчатом нагружении и задиристости упрочненной поверхности. Исследование осуществлялось согласно требованиям ГОСТ 23.224-86 и РД 50-339-83. Образцы исследуемого материала разделяли на две группы – контрольную (образцы, упрочненные по стандартной технологии) и исследуемую (образцы после ДЭУ). Испытания проводились по схеме «ролик – колодка». Для роликов (образцов) вы-

бран материал коленчатых валов, для колодок (контр-тел) – материал вкладыша. Стальные образцы контрольной группы изготавливали из материала двигателя КамАЗ-740 (сталь 42ХМФА), после чего они были обработаны по стандартной (существующей) технологии – закалка, высокий отпуск, азотирование. Для чугунных образцов контрольной группы выбран материал коленчатых валов двигателя Д80 после обработки по стандартной технологии – нормализация, высокий отпуск, а также – нормализация, высокий отпуск, закалка с нагревом ТВЧ, низкий отпуск.

Контр-телом служили колодки, изготовленные из бронзы БрС30 (материал вкладышей двигателя типа Д80) и алюминиевого сплава А20-1 с покрытием для приработки Рв-Sn-Cu (материал вкладышей двигателя КамАЗ-740).

Испытание на износ материала проводили по изменению веса образца при скорости скольжения 1,3 м/с и нагрузке 50 Н. В качестве смазочного материала использовали смазку М14В₃. Время испытаний – 10 часов. Зависимости коэффициентов трения от нагрузки определяли при ступенчатом нагружении в интервале нагрузок от 0,2 до 2,0 кН с шагом между ступенями 0,2 кН, что соответствует условиям эксплуатации коленчатых валов. Величину износа измеряли на аналитических весах типа АДВ 200 М, которые позволяют взвешивать образцы с точностью до 0,0001 г.

Для определения задиростойкости испытания выполняли при однократном смазывании образцов тонким слоем масла, а также при полном его удалении протиранием поверхности трения.

Испытания на усталость проводили в соответствии с ГОСТ 25502-79 на машине МУИ-6000, переоборудованной для укороченных образцов, по схеме чистого изгиба. База испытаний – 10^7 циклов.

3.6. Структура в зоне дискретного упрочнения

Как отмечалось в подразделе 3.3, для реализации ДЭУ были выбраны электроды из сталей 08Х18Н10Т, Р6М5 и ШХ15. Эти стали относятся к разным структурным классам (первая к аустенитному, вторая к ледебуритному, третья к мартенситному), существенно отличаются содержанием углерода и легирующих элементов, что позволило более объективно оценить их влияние на обработанные изделия и выбрать тот электрод, который бы в наибольшей степени обеспечивал необходимые свойства. Кроме стали 42ХМФА, применяемой для изготовления валов, ДЭУ подвергали сталь 45, которая была выбрана как модельная. Она не содержит легирующих элементов, что упрощало анализ их распределения в пятне при переносе с анода во время электроразряда.

Характер поверхности, формирующейся при действии дискретных разрядов, показан на рис. 3.5 (см. цветн. вклейку).

Микроструктура в зоне разряда на поперечных шлифах при обработке аустенитным электродом (08X18H10T) для образцов из чугуна приведена на рис. 3.6, *а* (см. цветн. вклейку), из стали 42ХМФА – на рис 3.6, *б* (см. цветн. вклейку).

Перенесенный с анода материал имеет вид белого слоя, что особенно четко видно на рис. 3.6, *а*. Это объясняется тем, что сталь 08X18H10T не травится 4-процентным спиртовым раствором азотной кислоты. Граница между «белым» слоем и расположенным под ним металлом резко выражена, линия сплавления сплошная, несплавлений, расслоений, зашлаковывания, раковин на границе не наблюдалось.

Аналогичную структуру при обработке аустенитным электродом имеет зона разряда и для стали 45 (рис. 3.7 (см. цветн. вклейку)).

При большем увеличении под «белым» слоем можно увидеть переходную зону (подслой). Его глубина изменяется в пределах 25-70 мкм. На рис. 3.8 (см. цветн. вклейку) приведена микроструктура зоны разряда с отпеча-

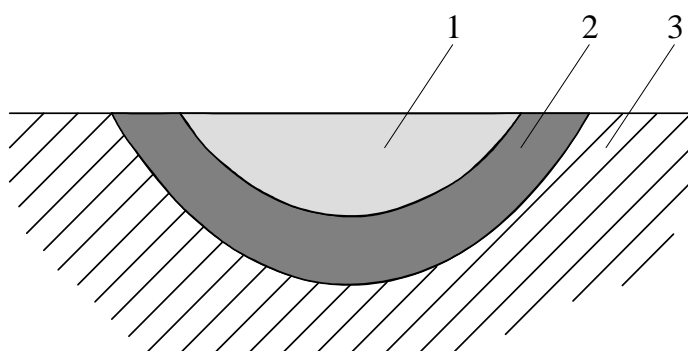


Рис. 3.9 – Схематическое изображение зоны дискретного упрочнения после шлифования: 1 – «белый» слой; 2 – подслоя; 3 – основной металл

чатками твердости, размер которых дает качественное представление об упрочнении поверхностного слоя. В данном случае для травления аустенитного поверхностного слоя был использован другой травитель. Как видно из рисунка, в нем обнаруживается микроструктура, и он уже не выглядит белым.

Схематически строение зоны дискретного упрочнения представлено на рис. 3.9.

3.7. Распределение элементов в области разряда

На рис. 3.10 (см. цветн. вклейку) приведена микроструктура чугуна в зоне разряда, а линией отмечен отрезок, на котором анализировалось распределение элементов с помощью микроанализатора MAP-3 после обработки аустенитным электродом (сталь 08X18H10T). Напомним, что исследование проводилось после шлифования обработанной поверхности.

Видно, что в «белом» слое чугунных образцов присутствуют включения графита. Это свидетельствует о том, что указанная область является смесью материалов электрода и образца, перемешавшихся в момент разряда, а

затем закристаллизовавшихся при охлаждении с высокой скоростью. При большем увеличении (рис. 3.10, б) обнаруживается, что под влиянием высокой температуры в момент разряда происходит частичное растворение графитных включений, вследствие чего вокруг них возникают зоны аустенита с повышенным содержанием углерода (на рис. 3.10, б они отмечены стрелками).

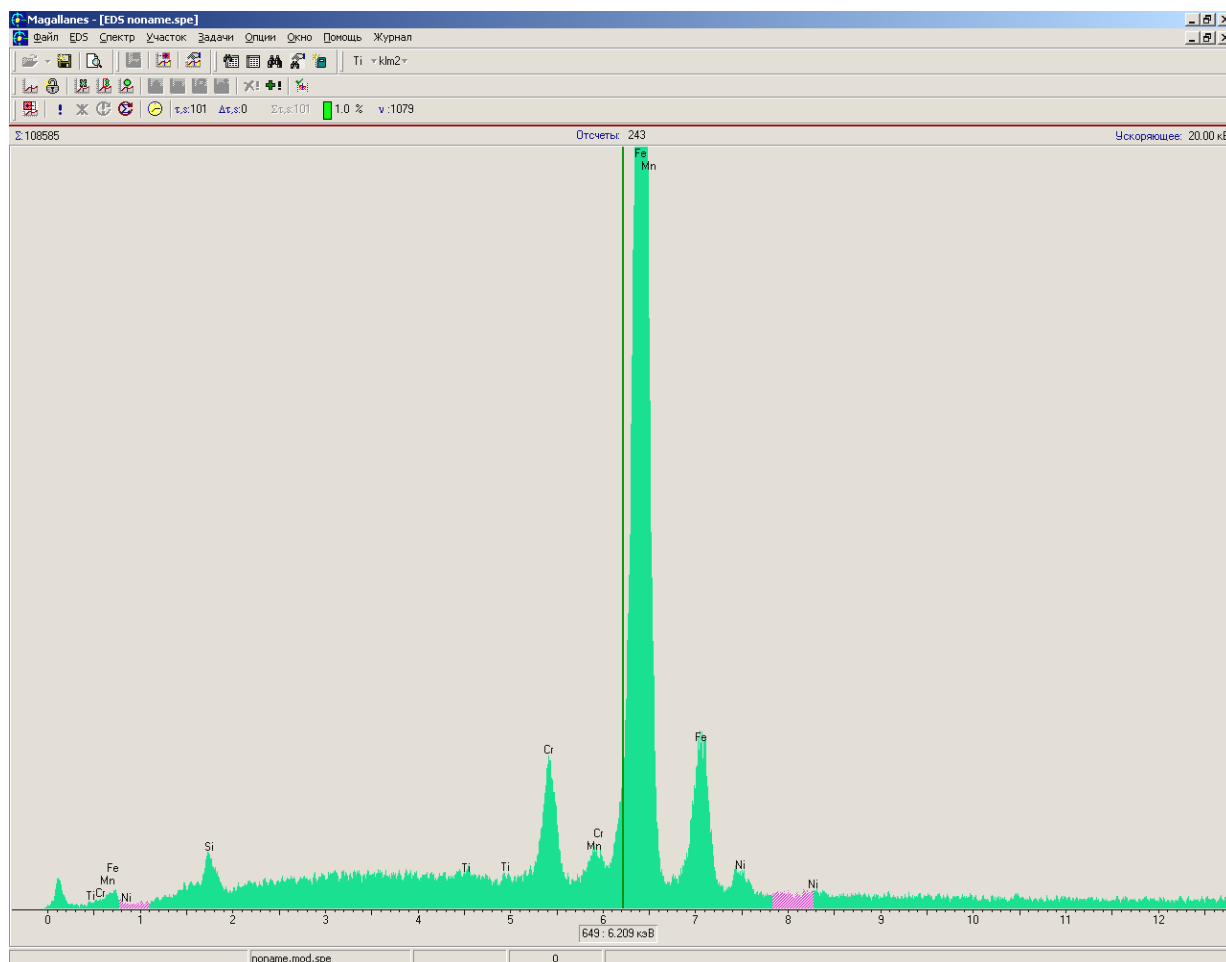
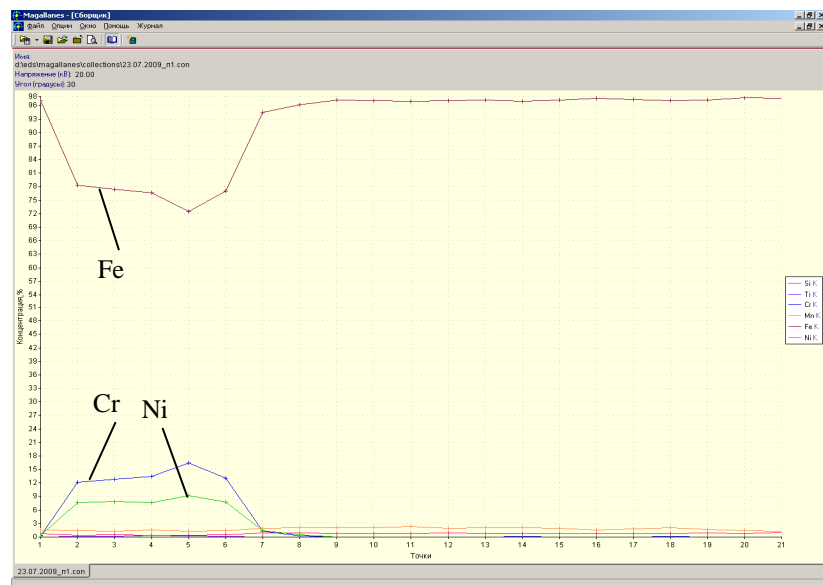


Рис. 3.11 – Спектр излучения, полученный с поверхности пятна разряда с помощью микроанализатора MAP-3

Количественное распределение элементов по глубине слоя иллюстрируется рисунками 3.11, 3.12. На рис. 3.11 показан вид спектра излучения с поверхности, подвергнутой ДЭУ.

Видно, что в спектре, кроме основных элементов, содержащихся в чугуне (железа, кремния, марганца), регистрируются элементы, перенесенные в процессе ДЭУ с анода – хром, никель, титан.

Распределение элементов по глубине зоны разряда показано на рис. 3.12, а, их примерное содержание на разном расстоянии от поверхности – на рис. 3.12, б, в, г, причем таблицы, приведенные на рис. 3.12, б – г, включают и содержание углерода.



Поверхность

Основной металл

a

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	26116	71.85
Cr K	9168	14.86
Ni K	1910	9.01
C K	58	2.88
Mn K	383	1.04
Si K	391	0.32
Ti K	34	0.03

б

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	35687	95.97
Mn K	785	2.18
C K	17	1.06
Si K	953	0.75
Cr K	135	0.04

в

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	34540	95.84
C K	24	1.62
Mn K	564	1.62
Si K	1041	0.85
Cr K	190	0.06

г

Рис. 3.12 – Распределение элементов по глубине зоны дискретного упрочнения (*a*) и их содержание на разном расстоянии от поверхности: *б* – 500мкм, *в* – 900 мкм, *г* ~ 1500 мкм

Усредненные данные о распределении элементов по глубине зоны в месте разряда приведены в табл. 3.1. Шаг сканирования равнялся 145 мкм.

Полученные результаты позволяют сделать ряд важных заключений.

1. Поверхностный слой содержит значительно меньшее, по сравнению с основным металлом, количество железа, что подтверждает перенос основных легирующих элементов (Cr, Ni, Ti) с анода на изделие.

2. Содержание элементов в этом слое не полностью отвечает их количеству в электроде. В большей мере это касается хрома. Так, регистрируемое содержание Ni уже начиная со второй точки (~ 290 мкм) практически соответствует его количеству в электроде (8–9 %). Содержание же хрома на всех глубинах не достигает марочного состава (18 %).

Таблица 3.1 – Распределение элементов по глубине чугунного образца после ДЭУ аустенитным электродом (сталь 08X18H10T)

kV	20	OffAn	30			
Step	145 мкм	Time	100 с.			
File_Name	Si K	Ti K	Cr K	Mn K	Fe K	Ni K
1	0.38	0.13	11.8	1.19	78.24	8.26
2	0.37	0.19	13.36	1.32	76.08	8.68
3	0.4	0.12	12.47	1.28	77.73	7.99
4	0.31	0.08	16.97	1.18	71.4	10.06
5	0.39	0.14	14.48	1.23	74.85	8.91
6	0.4	0.2	14.96	1.6	74.1	8.74
7	0.38	0.01	14.4	1.33	74.54	9.34
8	0.72	0	0.73	2.03	95.51	1.01
9	0.46	0.08	11.02	1.25	79.88	7.3
10	0.86	0	0.09	1.41	97.65	0
11	0.76	0	0.11	1.25	97.88	0
12	0.82	0	0.02	1.36	97.8	0
13	0.76	0	0.08	1.81	97.35	0
14	0.77	0	0.02	1.21	98	0
15	0.81	0	0.05	1.29	97.84	0
16	0.77	0	0.05	1.51	97.67	0
17	0.8	0	0.08	1.52	97.6	0
18	0.88	0	0.09	1.67	97.36	0
19	0.73	0.01	0.06	1.61	97.59	0
20	0.81	0.01	0.02	1.63	97.52	0

3. Отличие количества легирующих элементов в слое является следствием перемешивания металла основы с материалом анода и, возможно, их выгорания при переносе. При этом вследствие кратковременности процесса гомогенизация состава не успевает произойти. Разброс значений концентрации хрома составляет около 37 %, никеля ~ 21 %.

4. Толщина зоны с повышенным содержанием Ni и Cr равняется ~ 1 мм (в табл. 3.1 это соответствует точкам от 1 до 7). В переходной зоне (в подслое) количество хрома и никеля довольно резко уменьшается (точки 8 – 10). Таким образом, толщина переходного слоя около 290 мкм. Однако следует обратить внимание на большой разброс концентрации легирующих элементов в этой области: в точке 8 содержание Cr 0,7 %, Ni 1,01 %, в точке 9 соответственно 11 и 7,3 %, а в точке 11 эти элементы уже не регистрируются. Это свидетельствует о неодинаковой толщине переходного слоя.

5. Отсутствие выравнивания состава в граничащих областях свидетельствует о незначительной роли диффузии в процессе ДЭУ вследствие малой длительности разряда и высокой скорости охлаждения. Химический состав изменяется главным образом за счет перемешивания и растворения графита.

6. Растворение графита приводит к значительному повышению содержания углерода в «белом» (аустенитном) слое – с 0,08 % в материале электрода до 2,88-2,89 % в верхней зоне пятна разряда, где достигается наивысшая температура (рис. 3.12, б). По мере удаления от поверхности температура снижается, что сопровождается уменьшением растворимости графита, и содержание углерода постепенно снижается – до 1,06 на расстоянии ~ 900 мкм (рис. 3.12, в), а затем начинает увеличиваться – до 1,62 на расстоянии ~ 500 мкм (рис. 3.12, г). Таким образом, содержание легирующих элементов по глубине зоны уменьшается, а количество углерода изменяется немонотонно, достигая минимума на определенном расстоянии от поверхности.

Наличие подслоя является важным фактором для обеспечения необходимых свойств в упрочненных деталях, поскольку благодаря его присутствию осуществляется постепенный переход от поверхностной зоны к сердцевине. Особенно позитивную роль играет уменьшение содержания углерода при переходе от аустенитной структуры, свойственной материалу анода, к чугуну. Это заметно уменьшает склонность к охрупчиванию и повышает трещиностойкость изделий.

Аналогичные данные были получены для всех проанализированных образцов, что свидетельствует о достоверности оценки химического состава разных зон электроискрового разряда.

Было также изучено распределение элементов при дискретной обработке стали 45 электродом из стали 08X18H10T. На рис. 3.13 (см. цветн. вклейку) показана область границы между основным и перенесённым с анода материалом. На снимке хорошо видна довольно резкая сплошная граница, не содержащая видимых макродефектов.

Спектр излучения с поверхности после ДЭУ приведен на рис. 3.14. Усредненное количество элементов на этой поверхности дано на рис. 3.15.

Видно, что в стали 45, как и в чугуне, количество хрома и никеля в зоне дискретного упрочнения меньше, чем их содержание в электроде (рис. 3.15).

Распределение элементов вдоль линии, отмеченной на рис. 3.13, показано на рис. 3.16.

Из приведенных данных видно, что перераспределение легирующих эле-

ментов между основой (сталь 45) и металлом, нанесённым при электроискровом разряде с электрода из стали 08X18H10T, осуществляется в узком интервале – около 20 мкм.

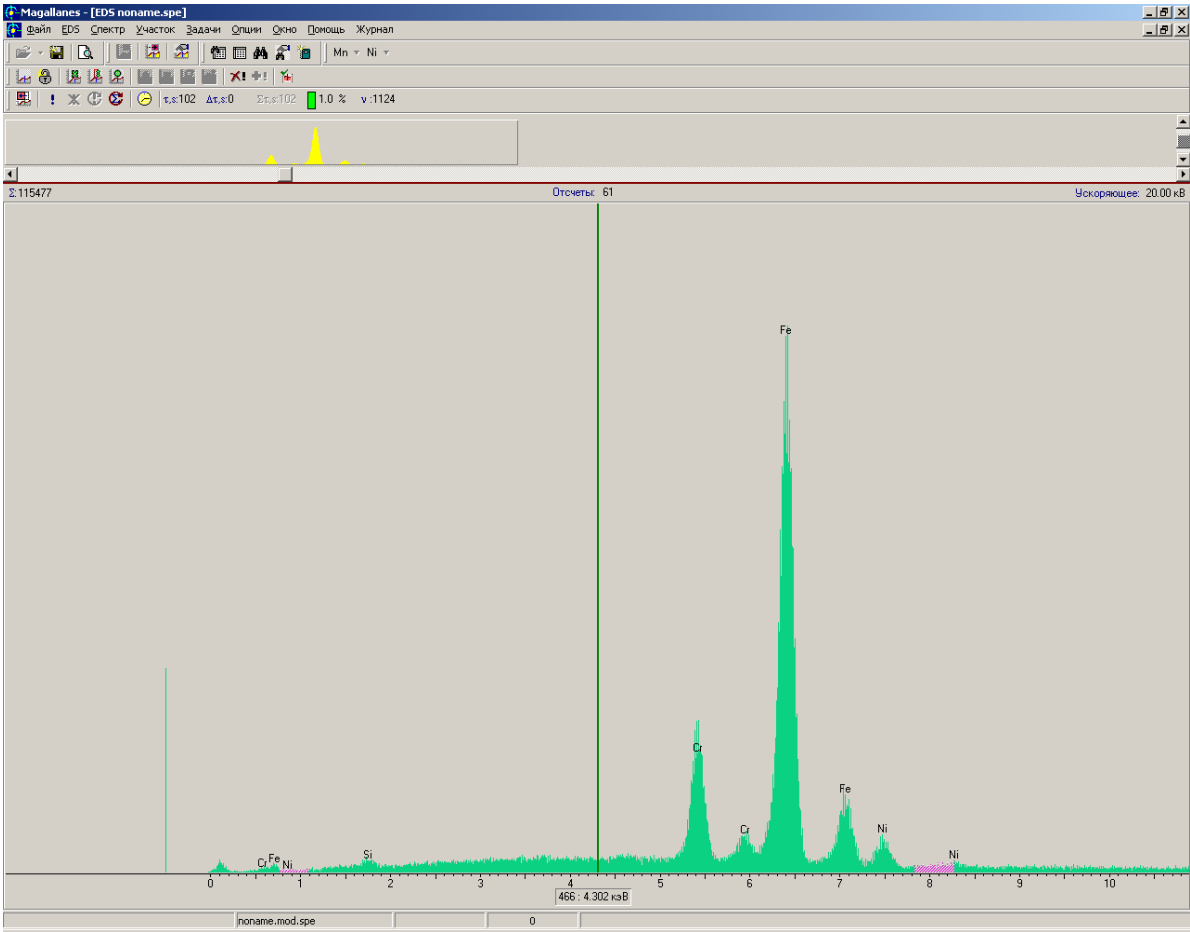


Рис. 3.14 – Спектр излучения с поверхности стали 45 после ДЭУ

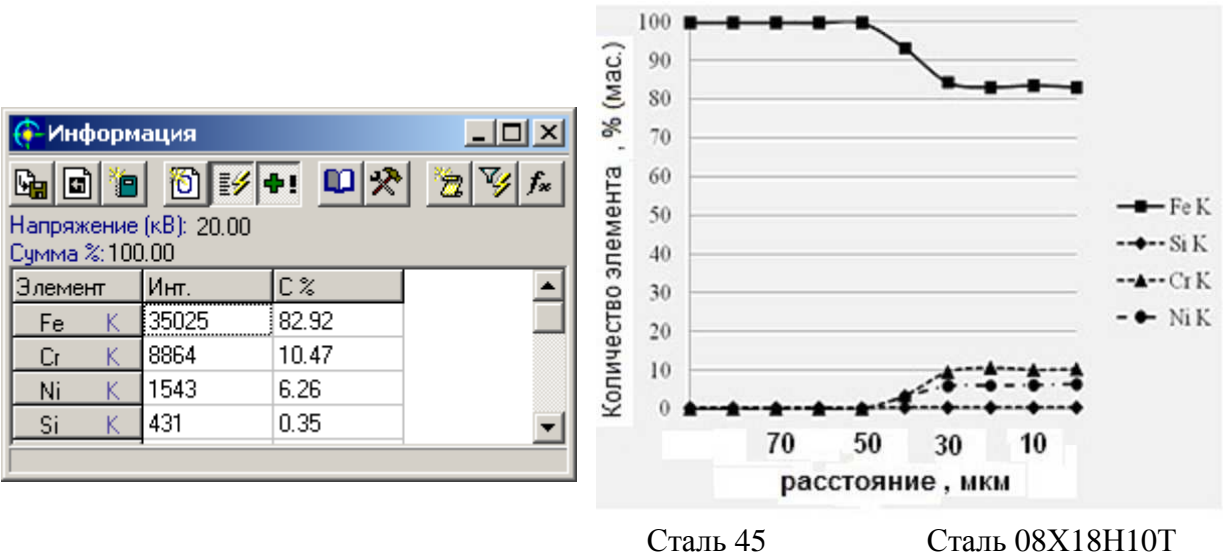


Рис. 3.15 – Химический состав поверхностного слоя стали 45 в месте электроискрового разряда

Рис. 3.16 – Распределение элементов по глубине после ДЭУ стали 45 аустенитным электродом

3.8. Влияние силы тока разряда на глубину, микротвердость зоны дискретного упрочнения и образование в ней дефектов

Измерение микротвердости при ДЭУ чугуна всеми выбранными для исследования электродами показало, что ее значения всегда превышают микротвердость основного металла, независимо от выбранного электрода. Режимы обработки и результаты исследований приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Влияние тока разряда на глубину упрочненного слоя, его микротвердость и присутствие макродефектов при обработке чугуна разными электродами

№	Материал электрода	Ток разряда I_p , А	Глубина упрочненного слоя, мкм	Микротвердость, МПа	Наличие дефектов
1	08X18H10T	20	10-11,0	580-750	нет
		40	50-160	580-900	нет
		60	250-400	600-1000	нет
2	Р6М5	20	40-50	760-900	нет
		40	50-100	800-900	есть
		60	50-160	580-1400	есть
3	ШХ15	20	5-10,0	500-610	нет
		40	5-12	520-630	нет
		60	10-12	500-650	есть

Из анализа таблицы можно сделать ряд важных выводов:

1. Из всех исследованных материалов только применение в качестве электрода стали 08X18H10T не приводит к образованию макродефектов (микротрещин) после электроискрового разряда, независимо от силы тока в пределах 20-60 А.

2. Для всех электродов глубина и твердость упрочненного слоя повышается с увеличением тока разряда. Однако интенсивность повышения глубины слоя зависит от материала электрода. Так, для электрода из стали 08X18H10T при изменении силы тока втрое толщина слоя увеличивается в 25-40 раз, тогда как при таком же повышении тока для электрода из стали Р6М5 она возрастает всего в три раза. Наименьшая толщина упрочненного слоя получается при использовании в качестве электрода стали ШХ15.

4. Значения микротвердости увеличиваются при повышении тока разряда, но характеризуются большим разбросом. Это связано с неомогенностью по составу наплавленного слоя, о чем шла речь в подразделе 3.7.

5. Глубина упрочненного слоя для электрода из стали 08X18H10T составляет 250-400 мкм, что полностью отвечает техническим требованиям, предъявляемым к коренным и шатунным шейкам коленчатых валов.

6. Высокая твердость в пятне разряда (не менее 58 HRC) при обработке электродом из стали 08X18H10T дает основание рассчитывать на обес-

печение требуемой износостойкости шеек. Можно также допустить, что вследствие хрупкости продукты изнашивания при попадании в зону трения будут измельчаться. Это облегчит их вынос смазочной жидкостью из этой зоны, что также должно способствовать росту износостойкости.

На основании сказанного в качестве материала анода была выбрана сталь 08X18H10T. При высокой твердости она наиболее устойчива против образования микротрещин в процессе последующего быстрого охлаждения, что вполне естественно, поскольку основу наплавленного слоя составляет аустенит, которому свойственны высокие значения пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости. Кроме того, сталь легирована хромом, никелем и титаном, а эти элементы повышают сопротивление разупрочнению при росте температуры. Хром также значительно уменьшает склонность к наводораживанию металла изделия и препятствует ускоренному изнашиванию за счет этого процесса.

В табл. 3.3 приведены более подробные данные о влиянии силы тока на исследуемые параметры и склонность к образованию микротрещин в упрочненной области при обработке чугуна электродом из стали 08X18H10T.

Таблица 3.3 – Влияние силы тока разряда I_p на глубину упрочненного слоя h , микротвердость HV и присутствие микротрещин при ДЭУ чугуна электродом из стали 08X18H10T

I_p , А	h , мм	HV, МПа	Наличие микротрещин
10	0,005	-	нет
20	0,01	-	нет
30	0,013	580	нет
40	0,16	630	нет
50	0,29	780	нет
60	0,40	990	нет
70	0,41	1000	нет
80	0,47	1150	есть
90	0,47	1300	есть
100	0,48	1500	есть

Дальнейшими исследованиями было установлено, что наиболее стабильные свойства после дискретного упрочнения получаются при силе тока $I_p = 60-70$ А. Поэтому, несмотря на увеличение твердости с возрастанием силы тока, оптимальным был признан именно этот диапазон.

Распределение твердости по глубине упрочненного слоя при обработке чугуна и стали 45 приведено на рис. 3.17.

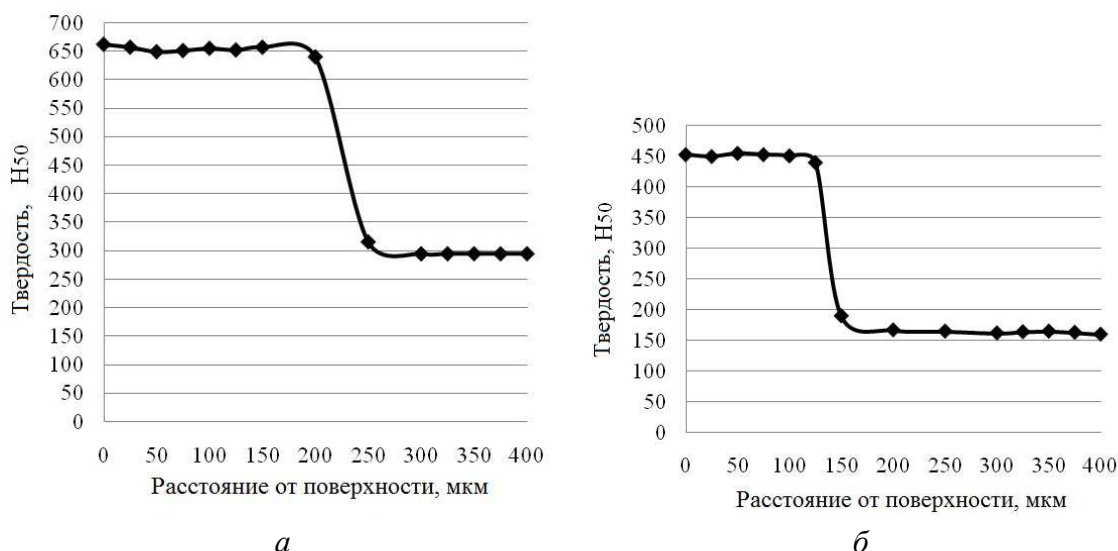


Рис. 3.17 – Распределение микротвердости по глубине зоны дискретного упрочнения чугуна (а) и стали 45 (б)

3.9. Влияние дискретности при дискретном электроискровом упрочнении на коэффициент трения

Под дискретностью (ϕ) понимается плотность расположения островков

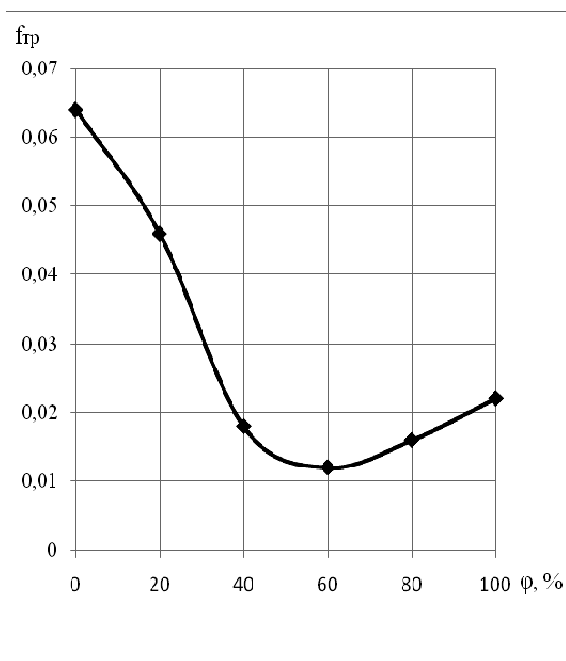


Рис. 3.18 – Зависимость коэффициента трения f чугуна от дискретности ϕ при нагрузке 1 кН

разряда на обрабатываемой поверхности. В выполненных экспериментах ее изменяли от $\phi = 0$ (без ДЭУ) до $\phi \sim 95\%$ через 20 %. Обработку осуществляли при силе тока разряда $I_p = 60-70$ А. Толщина электрода S равна 1 мм. Контр-телом служил материал вкладыша – бронза БрС30.

Зависимость коэффициента трения f от дискретности ϕ при постоянной нагрузке 1 кН приведена на рис. 3. 18.

Из этого рисунка видно, что минимальный коэффициент трения при нагрузке 1кН, близкой к рабочей при эксплуатации коленчатых валов, обеспечивается для дискретности 50–70 %.

Как отмечалось в методике экспериментальных исследований, анализировалось также изменение коэффициента трения от нагрузки. Полученные результаты для разных видов исходной и окончательной обработки чугуна обобщены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Зависимость коэффициента трения f от нагрузки после разных обработок

Обработка	Значения коэффициента трения при нагрузке P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Нормализация, высокий отпуск	0,040	0,040	0,050	0,058	0,064	0,078	0,087	0,094	0,109	0,116
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 20\%$	0,040	0,040	0,038	0,040	0,048	0,052	0,06	0,067	0,084	0,10
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 40\%$	0,032	0,028	0,018	0,018	0,017	0,013	0,013	0,013	0,011	0,012
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 60\%$	0,028	0,018	0,015	0,011	0,0115	0,011	0,01	0,0105	0,010	0,010
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 80\%$	0,035	0,030	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi \sim 95\%$	0,040	0,030	0,027	0,025	0,021	0,021	0,020	0,0195	0,0185	0,019
Нормализация, высокий отпуск	0,040	0,040	0,050	0,058	0,064	0,078	0,087	0,094	0,109	0,116
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 20\%$	0,040	0,040	0,038	0,040	0,048	0,052	0,06	0,067	0,084	0,10
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 40\%$	0,032	0,028	0,018	0,018	0,017	0,013	0,013	0,013	0,011	0,012
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 60\%$	0,028	0,018	0,015	0,011	0,0115	0,011	0,01	0,0105	0,010	0,010
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi = 80\%$	0,035	0,030	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014
Нормализация, высокий отпуск, ДЭУ, $\varphi \sim 95\%$	0,040	0,030	0,027	0,025	0,021	0,021	0,020	0,0195	0,0185	0,019
Нормализация, высокий отпуск, закалка ТВЧ	0,080	0,080	0,060	0,050	0,064	0,067	0,07			

Из этой таблицы вытекают следующие заключения.

1. При нагрузке 1 кН коэффициент трения после ДЭУ, независимо от степени дисперсности, ниже, чем в чугуне без такой обработки или после поверхностной закалки с нагревом ТВЧ.

2. Для чугуна без дискретного электроискрового упрочнения коэффициент трения с повышением нагрузки P возрастает, тогда как после упрочнения его значения уменьшаются для всех φ .

3. Величина дискретности является определяющим фактором для коэффициента трения. Для всех нагрузок он наименьший при $\varphi = 60\%$. Для

такой дискретности при $P = 0,2$ кН коэффициент трения f по сравнению с чугуном без ДЭУ снижается в 1,4 раза, при $P = 1$ кН – в 5,8, при $P = 2$ кН – более чем в 6 раз.

Таким образом, на основании всех приведенных результатов оптимальной дискретностью следует считать $\varphi = 50-70$ %.

3.10. Износостойкость чугуна после разной обработки

Для исследования износостойкости были выбраны 3 серии образцов, обработанных по разным режимам:

1 – после стандартной термической обработки, принятой для валов двигателей типа Д80 (нормализация, высокий отпуск); твердость 31-37 HRC;

2 – обработанные по режиму 1 + поверхностная закалка с нагревом ТВЧ; твердость 43-46 HRC;

3 – обработанные по режиму 1 + ДЭУ по оптимальному режиму (ток 60А, дискретность 60 %); твердость 50-55 HRC.

После ДЭУ ролики шлифовали с припуском 0,04 мм относительно номинального размера, а потом полировали в номинальный размер. Глубина упрочненного слоя составляла 250-400 мкм.

Шлифование и полирование всех образцов осуществляли по технологии обработки шеек коленчатых валов. Шероховатость поверхности после полирования соответствовала $Ra = 0,16$ мкм.

В качестве материала колодки, играющей роль вкладыша, выбрана бронза БрС30.

Результаты испытаний показаны в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний на износостойкость чугуна после разной обработки (вал – чугун, вкладыш – БрС30)

Режим	Износ ролика (вала), г	Износ колодки (вкладыша), г	Коэффициент трения, μ
1	0,0246	0,0183	0,064
2	0,0037	0,0106	0,062
3	0,0024-0,0021	0,0083-0,0104	0,012-0,019

Обращает на себя внимание значительный разброс значений μ после ДЭУ по сравнению с режимами 1 и 2. Это связано с неомогенностью по химическому составу упрочненной зоны. При этом во всем диапазоне разброса значения μ остаются более низкими. С точки же зрения износостойкости такая микронеоднородность должна положительно влиять на износостойкость, учитывая принцип Шарпи.

Что касается состояния после закалки с нагревом ТВЧ (режим 2), то, несмотря на такой же коэффициент трения, как и при обработке по режиму 1,

износ меньше. Это объясняется более высокой твердостью образца.

После ДЭУ снижается и износ контр-тела (вкладыша), т.е. такая обработка обеспечивает меньшую изнашивающую способность упрочненного вала по отношению к вкладышу.

В табл. 3.6 для этой пары и тех же режимов обработки показано изменение коэффициента трения от нагрузки P в начале и в конце испытаний на данной ступени нагружения (начальные значения указаны в числителе, конечные – в знаменателе). Для режима 3 (ДЭУ) приведены данные после сошлифовки слоя на разную глубину: $3 \sim 350$ мкм, $3^* \sim 250$ мкм.

Таблица 3.6 – Зависимость коэффициента трения пары чугун – БрС30 от нагрузки в начале и в конце ее приложения

Режим	Коэффициенты трения при нагрузке P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	$\frac{0,040}{0,040}$	$\frac{0,040}{0,040}$	$\frac{0,047}{0,053}$	$\frac{0,055}{0,060}$	$\frac{0,060}{0,068}$	$\frac{0,073}{0,083}$	$\frac{0,083}{0,091}$	$\frac{0,087}{0,102}$	$\frac{0,104}{0,115}$	$\frac{0,116}{0,116}$
2	$\frac{0,040}{0,040}$	$\frac{0,030}{0,025}$	$\frac{0,023}{0,023}$	$\frac{0,025}{0,025}$	$\frac{0,028}{0,034}$	$\frac{0,037}{0,043}$	$\frac{0,044}{0,044}$	$\frac{0,044}{0,044}$	$\frac{0,044}{0,045}$	$\frac{0,048}{0,052}$
3	$\frac{0,040}{0,040}$	$\frac{0,030}{0,030}$	$\frac{0,027}{0,027}$	$\frac{0,025}{0,023}$	$\frac{0,022}{0,020}$	$\frac{0,022}{0,020}$	$\frac{0,020}{0,020}$	$\frac{0,020}{0,019}$	$\frac{0,019}{0,018}$	$\frac{0,020}{0,018}$
3^*	$\frac{0,040}{0,030}$	$\frac{0,020}{0,020}$	$\frac{0,016}{0,013}$	$\frac{0,015}{0,013}$	$\frac{0,012}{0,012}$	$\frac{0,013}{0,013}$	$\frac{0,013}{0,013}$	$\frac{0,013}{0,013}$	$\frac{0,013}{0,013}$	$\frac{0,014}{0,014}$

Из данных этой таблицы видно, что в образцах, обработанных по режимам 1 и 2 (без ДЭУ), начиная с $P = 0,6$ кН (режим 1) и $P = 1,0$ кН (режим 2), коэффициент трения в конце испытаний на данной ступени нагружения (знаменатель) больше, чем в начале (числитель). Это можно объяснить повышением шероховатости поверхности при каждом цикле нагружения. После ДЭУ (режим 3) изменение коэффициента трения не наблюдается, что свидетельствует о меньшей повреждаемости поверхности трения. Обращает на себя внимание и тот факт, что после ДЭУ коэффициент трения зависит от глубины сошлифованного слоя. Это следует учитывать при назначении допуска на обработку.

При эксплуатации деталей одним из возможных дефектов шеек коленчатых валов может быть задира. Образование задира приводит к катастрофическому износу поверхности шеек. В момент его возникновения резко увеличивается коэффициент трения, растет температура, происходит схватывание трущихся поверхностей, появляются динамические нагрузки. В связи с этим важным является сравнение задиристости после разных режимов обработки коленчатых валов. Результаты этих испытаний приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты испытаний на задиростойкость при однократном смазывании чугуна, обработанного по разным режимам

Режим	Коэффициенты трения при нагрузке P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	0,160	0,120	0,106	0,125	0,112	0,113	0,096	0,100	↑	
2	0,08	0,98	0,06	0,05	0,064	0,067	0,071	0,075	0,071	0,068
3	0,060	0,040	0,040	0,033	0,032	0,031	0,031	0,034	0,040	0,034

Из таблицы видно, что при однократном погружении в масло на образцах после нормализации с высоким отпуском (режим 1) задир появлялся при нагрузке 1,8 кН (в табл. 3.7 это отмечено стрелкой вверх). Образцы, подвергнутые поверхностной закалке (режим 2) и ДЭУ (режим 3), выдержали без задиорообразования максимальную нагрузку (2,0 кН).

После удаления смазки в нормализованных образцах задир появлялся при нагрузке 1,6 кН, в образцах после поверхностной закалки – при $P = 2,0$ кН, а после ДЭУ задир не образовывался в пределах изменения нагрузки. При этом коэффициент трения оставался более низким, чем в начале испытаний.

3.11. Износостойкость стали 42ХМФА после разной обработки

Для определения влияния ДЭУ на триботехнические характеристики стали 42ХМФА были испытаны две серии образцов:

1 – после обработки по стандартной технологии, принятой для коленчатых валов автомобиля КамАЗ (улучшение и последующее азотирование);

2 – после нормализации, высокого отпуска и ДЭУ с финишной механической обработкой в номинальный размер с глубиной упрочненного слоя в пределах 260-410 мкм.

Нагрузки изменяли в диапазоне 0,2-2,0 кН. На базе этих испытаний были определены средние значения коэффициентов трения при разных нагрузках, износостойкость и изнашивающая способность материала образцов после разной обработки при нагрузке 1,0 кН. Чтобы приблизить условия испытаний к реальным (возможное попадание абразивных частиц в масло), испытания проводили как в чистом масле М14В₃, так и в масле с добавкой 0,5 % абразива (SiO₂) с размером частиц 0,1-0,2 мм.

Результаты испытаний в масле без абразивных частиц приведены в табл. 3.8. Коэффициенты трения определяли в начале и в конце каждой стадии нагружения. Однако для стальных образцов различия не превышали 0,005, поэтому в табл. 3.8 показаны средние значения.

Таблица 3.8 – Зависимость коэффициента трения стали 42ХНМФ от нагрузки после различной обработки

Режим	Коэффициент трения при нагрузке P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	0,043	0,042	0,036	0,032	0,029	0,029	0,028	0,028	0,030	0,030
2	0,043	0,040	0,035	0,031	0,025	0,024	0,024	0,023	0,022	0,022

Как видно из таблицы, при нагрузке 0,2 кН коэффициенты трения для обоих режимов одинаковы и уменьшаются с ростом P , но после ДЭУ (режим 2) это снижение значительнее. Вследствие этого коэффициент трения образца после ДЭУ при $P = 2$ кН в 1,4 раза меньше, чем после азотирования.

Результаты испытаний на износостойкость стальных образцов в паре с вкладышем из сплава А20-1 в чистом масле после разной обработки приведены в табл. 3.9. Для образцов после ДЭУ приведены данные после шлифовки на разную глубину: 2 ~ 5 мкм, 2* ~ 10 мкм.

Таблица 3.9 – Триботехнические характеристики стальных образцов после разных режимов обработки при испытаниях в масле без абразива; время испытаний – 10 часов; $P = 1$ кН

Режим	Износ ролика Δ_B (вала), г	Износ колодки Δ_K (вкладыша), г	Отношение Δ_B к минимальному	Отношение Δ_K к минимальному
1	0,0147	0,0084	3,5	2,6
2	0,0089	0,0068	2	2,1
2*	0,0042	0,0032	–	–

Из таблицы четко видно, что после ДЭУ уменьшается износ как роликов, так и колодок. При этом установлено, что по глубине пятна разряда износ неодинаков: на определенной глубине он становится минимальным. В нашем случае наименьший износ регистрируется на глубине ~10 мкм. Из этих данных следует, что ДЭУ по износостойкости может увеличить долговечность валов в 3,5 раза по сравнению с азотированием и уменьшить изнашивающую способность по отношению к вкладышам в 2,6 раза.

Результаты, полученные при испытаниях в масле с добавками абразивных частиц, показаны в табл. 3.10.

Таблица 3.10 – Абразивная износостойкость стальных образцов после разной обработки

Режим	Износ ролика, г за время испытаний, час			Износ колодки, г за время испытаний, час		
	10	20	30	10	20	30
1	0,062	0,065	0,068	0,490	0,691	0,898
2	0,020	0,023	0,026	0,220	0,323	0,336

Видно, что и в присутствии абразивных частиц после ДЭУ износостойкость стального вала остается примерно втрое, а вкладыша вдвое более высокой, чем после азотирования. Это можно объяснить лучшей прираба-

тываемостью поверхности вала после ДЭУ, что подтверждается рис. 3.19, который иллюстрирует динамику изнашивания роликов и колодок.

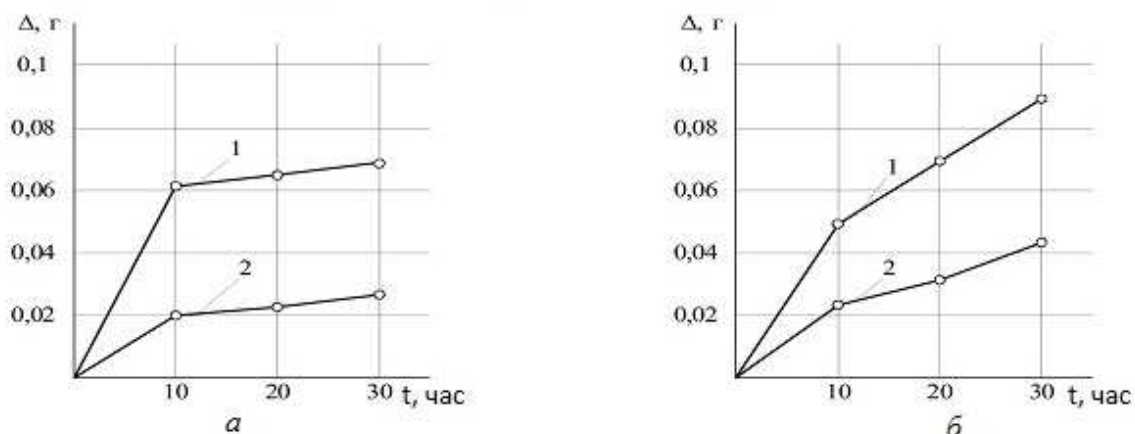


Рис. 3.19 – Зависимость износа материала ролика (а) и колодки (б) от времени испытаний: 1 – азотирование; 2 – ДЭУ

Подытоживая сказанное, можно заключить, что независимо от материала валов (сталь, чугун) ДЭУ заметно снижает износ как валов, так и вкладышей. Это можно объяснить следующим образом.

Как известно, при выборе материала вкладыша применяют принцип Шарпи – структура материала должна быть микогетерогенной, т.е. такой, в которой чередуются мягкие и твёрдые структурные составляющие. Что же касается структуры материала вала, то после существующих способов упрочнения поверхности (закалка ТВЧ, азотирование) она имеет однородный характер и равномерное распределение твердости по поверхности трения.

При ДЭУ и на поверхности вала образуется микогетерогенная структура, в которой чередуются упрочненные и неупрочненные зоны, иными словами, принцип Шарпи реализуется и для вала. Это создает лучшие условия для удержания масляной пленки между шейкой вала и вкладышем, полностью исключает возможность сухого трения даже при достаточно высоком удельном давлении, в результате чего повышается износостойкость и уменьшается изнашивающая способность вала относительно вкладыша.

3.12. Влияние дискретного электроискрового упрочнения на сопротивление усталости чугунных образцов

Испытаниям на сопротивление усталостному разрушению подвергали образцы после стандартной обработки (нормализация с высоким отпуском) и после ДЭУ по оптимальному режиму. Образцы полировали и обследовали на присутствие дефектов. Для каждого режима для испытаний отбирали образцы как без поверхностных дефектов, так и с дефектами, что позволяло оценить чувствительность образцов к наличию концентраторов напряже-

ний. В стандартно обработанных образцах на поверхности регистрирова-

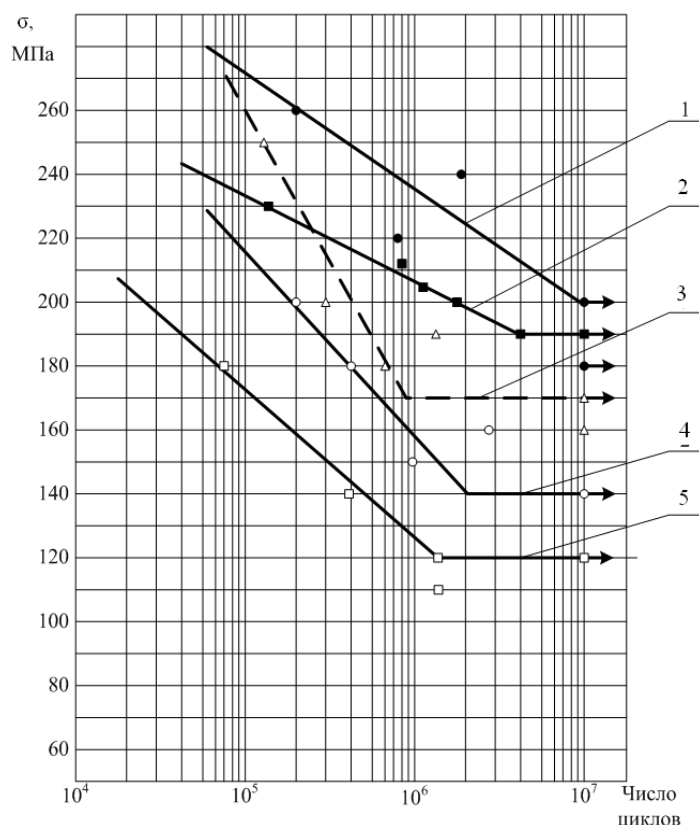


Рис. 3.20. Кривые усталости для чугунных образцов после разной обработки: 1 – стандартная обработка, образец без дефектов; 2 – ДЭУ, образец без дефектов; 3 – данные заводских испытаний серийного чугуна после стандартной обработки; 4 – стандартная обработка, образец с дефектами; 5 – ДЭУ, образец с дефектами

рийного чугуна такого же химического состава после стандартной обработки (кр. 3), для которого предел выносливости равен 170 МПа.

Значения предела выносливости для указанных состояний (отмечены номерами в скобках) показаны в табл. 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты испытаний чугунных образцов на сопротивление усталости

Обработка	Качество поверхности после полирования	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
Стандартная	без дефектов (1)	200
	литейные дефекты (4)	140
Стандартная + ДЭУ	без дефектов (2)	190
	грубые дефекты (5)	120

Важным фактором при анализе сопротивления усталости является место разрушения образцов. Данные многих исследований свидетельствуют, что при поверхностной закалке с нагревом ТВЧ или лазерным излучением граница упрочненного слоя является технологическим концентратором растягивающих напряжений образцов из высокопрочного чугуна. Это снижает их

единичные литейные дефекты типа рыхлот (размером 0,5-1,5 мм и глубиной до 1 мм). На образцах после ДЭУ дефекты сохранялись за счет уменьшения припуска под финишную обработку до 0,02-0,16 мм. После полирования размер этих дефектов приблизительно соответствовал дефектам стандартных образцов.

Кривые усталости приведены на рис. 3.20.

Из таблицы видно, что предел выносливости образцов после ДЭУ близок к σ_{-1} стандартно обработанных образцов при условии, что на поверхности нет дефектов – 190 та 200 МПа соответственно. Эти отличия соответствуют области рассеяния значений, что подтверждает кривая усталости для се-

сопротивление усталости.

На рис. 3.21 (см. цветн. вкладку) приведен вид разрушенных усталостных образцов, обработанных по разным режимам.

Видно, что все образцы разрушились в центральной части. Нужно подчеркнуть, что не наблюдалось ни одного случая разрушения образцов по границе дискретно упрочненной зоны. Таким образом, можно утверждать, что ДЭУ при отсутствии поверхностных дефектов не создает технологических концентраторов напряжений и не снижает усталостной прочности.

Данный способ является эффективным для повышения долговечности как чугунных, так и стальных валов.

Литература к разделу 3

1. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. – Х., 2008. – 19 с.

2. Гончаров В.Г. Наукові основи зміцнення поверхонь високонавантажених елементів двигунів / В.Г. Гончаров, М.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, С.О. Кравченко, В.М. Шеремет // Вісник НТУ “ХПІ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2009. – №28. – С.20-30.

3. Гончаров В.Г. Дискретные покрытия – эффективный способ упрочнения деталей автомобилей / В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков, Н.Г. Александров // Сб. докл. Девета научно-техніческа конференция с международно участие. «Транспорт, екологія – устойчиво развитие» – Варна: Изд. ТУ – Варна, – 2003. – С. 282–289.

4. Кравченко С.А. Повышение надёжности деталей двигателей методом дискретного упрочнения / С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров.// Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – №1. – С. 97-99.

5. Матеріалознавство. Підручник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. За ред. проф. С.С. Дяченко. - Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.

РАЗДЕЛ 4

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

Как известно, проблема упрочнения поверхностей высоконагруженных элементов машин (ВЭМ) традиционными поверхностными методами сталкивается с противоречием между стоимостью, энергоемкостью, качеством. В разделе 3 описана принципиально новая технология дискретно-континуального упрочнения – ДЭУ и показано положительное влияние этой обработки на служебные свойства стальных и чугунных валов. Однако неисследованным осталось напряженно-деформированное состояние (НДС) изделия, хотя, как отмечено в разделе 3, в результате импульсного нагрева, реактивного воздействия плазмы и ее расширения в момент спада тока в импульсе в зоне разряда возникают термомеханические напряжения, а при контактном взаимодействии они дополняются рабочими напряжениями.

Основная теоретическая база метода обобщенного параметрического моделирования сложных и сверхсложных механических систем, предложенная и реализованная в работе в виде современного мощного программно-аппаратного комплекса (см. разд. 2), позволяет произвести расчет напряженно-деформированного состояния на примере фрагмента коленчатого вала тепловозного двигателя, подвергнутого ДЭУ.

Подходы к решению поставленной задачи. Износ поверхностей трения, как уже отмечалось, происходит в результате двух разновидностей механического изнашивания – абразивного и усталостного. Поэтому долговечность и ресурс работы коленчатых валов двигателей, в основном, определяются двумя параметрами – усталостной прочностью изделия и износостойкостью поверхности шеек. Если вопрос повышения усталостной прочности коленчатого вала и вообще всех элементов трибосистем двигателя решается в значительной мере на стадии их проектирования и назначения объемной термической обработки, то износостойкость деталей полностью зависит от методов упрочнения их поверхностных элементов.

Общим и наиболее существенным недостатком всех традиционных методов поверхностного упрочнения является то, что они сводятся лишь к повышению твердости материала поверхностного слоя детали. Но, как известно, одна твердость не может однозначно характеризовать износостойкость. В результате этого ресурс двигателей до отправки на капитальный ремонт в реальных условиях эксплуатации оказывается существенно ниже нормативного.

В данном подразделе описаны подходы, модели и получение численного результата напряженно-деформированного состояния фрагмента ко-

ленчатого вала, обработанного методом дискретного упрочнения.

Поставленная задача сводится к необходимости проведения многовариантных исследований объекта сложной формы с неоднородными материалами при различных сочетаниях параметров технологического процесса. Проблема является актуальной для разработки общего метода описания расчетных моделей сложных и сверхсложных механических систем, которые учитывают количественные, качественные, структурные характеристики исследуемых объектов. Ее решение требует значительных вычислительных ресурсов и новых подходов. Для этого использован разработанный и описанный в разд. 2 современный мощный программно-аппаратный комплекс для исследования характеристик прочности и жесткости элементов сложных механических систем. Решение осуществлено, следуя работам [1 – 3]

Численный анализ напряженно-деформированного состояния элементов вала после ДЭУ. На рис. 4.1 приведена схема расположения дискретных разрядов на опорной части вала и обнаруженные при металлографических исследованиях характерные участки структуры в области разряда (см. разд. 3). Подслой состоит из двух участков, отличающихся составом легирующих элементов, перенесенных с анода.

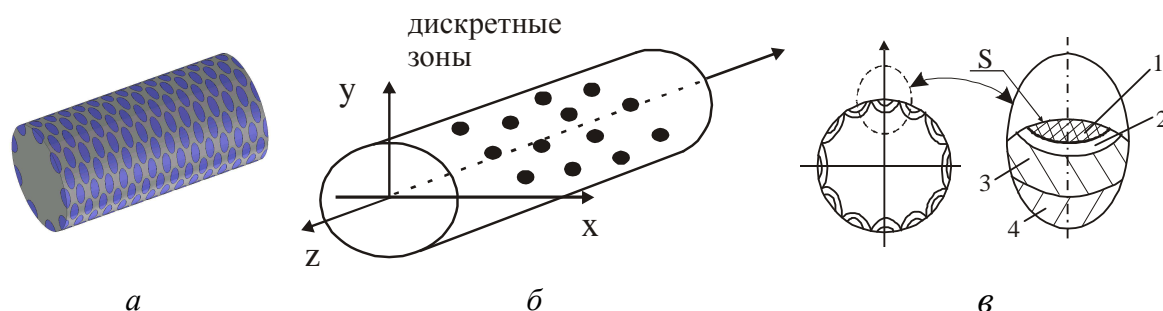


Рис. 4.1 – Фрагмент упрочненной части опорной поверхности вала (геометрия показана условно) (а), схема расположения разрядов (б) и характерные участки структуры (в) после ДЭУ: 1 – «белый» слой; 2, 3 – подслои; 4 – основной металл

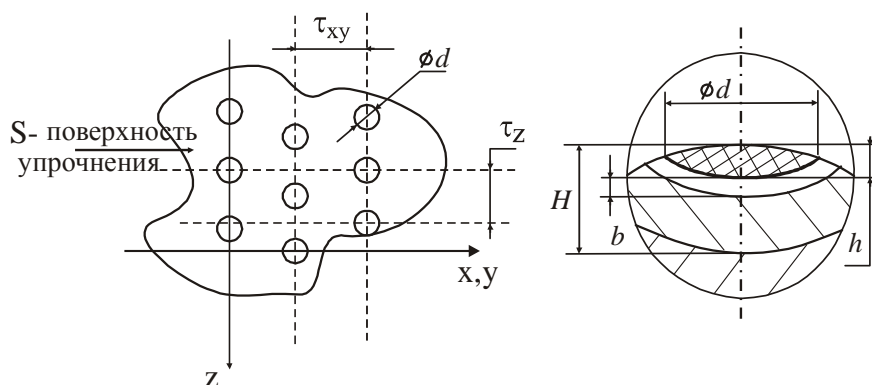


Рис. 4.2 – Принятые при моделировании обозначения

ный легирующими элементами; τ_{xy} и τ_z – шаг в окружном и осевом направлениях, соответственно.

На рис. 4.2 показаны принятые при моделировании обозначения в дискретной зоне упрочнения (ДЗУ): d и h – диаметр и глубина «белого» слоя; H – общая глубина подслоя, b – участок подслоя, обогащен-

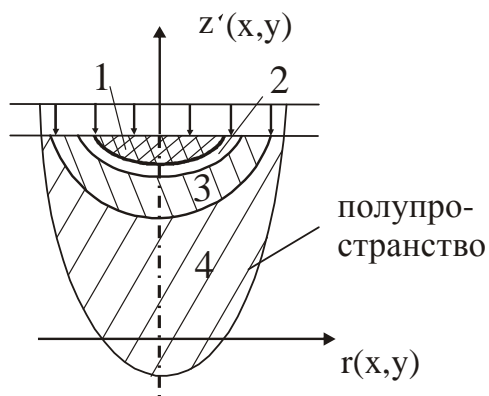


Рис. 4.3 – Расчетная схема для определения НДС в ДЗУ

Плотность покрытия поверхности S (коэффициент дискретности) определяется зависимостью $f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$. Принятые обозначения свойств: E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона; $\sigma_{0,2}$ – уловный предел текучести; σ_b – временное сопротивление. Для разных участков свойства отмечаются индексом i ($i = 1, 2, 3, 4$), отвечающим номеру участка на расчетной схеме (рис. 4.3). Таким образом, перечень параметров технологического процесса ДЭУ – $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_{0,2}, \sigma_b, h, b, H\}$ – это вся совокупность индексированных по номеру участка свойств материала.

На первом этапе для получения осесимметричной картины НДС в ДЗУ была построена конечно-элементная модель из 1,5 млн. узлов и 403 тыс. элементов (рис. 4.4) (см. цветн. вклейку).

Качественные картины компонентов НДС при соотношении модулей упругости $\alpha_1 = E_1 / E_4 = 1,2$; $\alpha_2 = E_2 / E_4 = 1,1$; $\alpha_3 = E_3 / E_4 = 1,0$; $\beta_1 = \nu_1 / \nu_4 = 1,0$; $\beta_2 = \nu_2 / \nu_4 = 1,0$; $\beta_3 = \nu_3 / \nu_4 = 1,0$ приведены на рис. 4.5 (см. цветн. вклейку). Видно, что профиль деформированной поверхности благоприятен для работы в процессе контактного взаимодействия, поскольку контактное давление перераспределяется, увеличиваясь в области легированного более жесткого материала и уменьшаясь при удалении от него. Таким образом, после ДЭУ не только достигается упрочнение, но и улучшаются условия трения (в силу более низкого коэффициента трения материала 1 (см. рис. 4.3) по сопряженной детали).

Данное явление названо Δ -эффектом. Чем больше давление, тем более деформируется тело детали, тем больший эффект перераспределения усилий контактного взаимодействия в сторону наиболее прочного участка сопряжения. Следовательно, при изменении контактного давления эффект является стабильным.

Для анализа влияния разных факторов на НДС реальных конструкций, подвергнутых ДЭУ, построена пространственная конечно-элементная модель (КЭМ) фрагмента приповерхностной части опорной части вала после ДЭУ. Поскольку для полного моделирования опорной части вала нужна слишком большая (сотни миллионов степеней свободы) КЭМ, то было определено репрезентативное множество (часть детали), которое входит в состав соответствующего секторного выреза (рис. 4.6, см. цветн. вклейку).

На рис. 4.7 (см. цветн. вклейку), 4.8 приведена типичная картина рас-

пределения вертикальных перемещений вдоль отрезка прямой, проходящей через центры ДЗУ. Видно, что наблюдается та же картина перемещений, что и в случае единичных ДЗУ, но с периодом повторения, который равен шагу размещения ДЗУ.

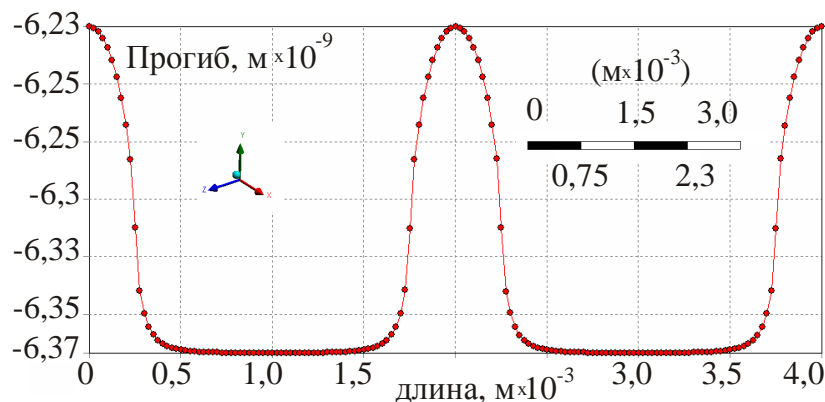


Рис. 4.8 – Картина перемещений точек поверхности детали

Как видно из сравнительного анализа полученных распределений компонентов НДС (см. цветн. вклейку), увеличение относительной жесткости материала упрочнения способствует усилению положительного влияния обнаруженного Δ -эффекта упрочнения и увеличению устойчивости поверхности S к износу. Что касается влияния параметра φ , то в области его оптимальных значений $0,55 \div 0,75$ (см. раздел 3) Δ -эффект наиболее действенный.

Как показал анализ напряженного состояния опорной части вала, кроме обнаруженного Δ -эффекта, значение имеет еще и другой эффект, названный здесь « σ -эффектом». Он заключается в том, что при совместном деформировании расплавленного материала ДЗУ создается остаточное напряженное состояние, которое при суперпозиции с напряженным состоянием от действия давления p дает эффект уменьшения уровня опасности результирующих напряжений. Анализ показывает, что наибольший « σ -эффект» также достигается в диапазоне φ $0,55 \div 0,75$.

Кроме того, были проведены численные исследования контактного взаимодействия с участием упрочненных деталей. Это вызвано тем, что в настоящее время отсутствует достаточно подробный анализ особенностей, привносимых на микроуровне, в процесс контактного взаимодействия дискретно упрочненных деталей. Эта актуальная задача частично решена и описана в представленной работе.

В качестве исследуемого объекта был рассмотрен фрагмент двух контактирующих упругих тел, одно из которых содержит полуовальную зону с размерами $0,6 \times 0,6 \times 0,4$ мм. Это и есть зона дискретного упрочнения. Она состо-

ит из высоколегированного материала (сталь 08X18H10T), а материал основного материала – чугун ТУ Д70.05.ДТ:1978. Из исследуемой системы вычленен отдельный фрагмент (рис. 4.10 (см. цветн. вклейку)). По размерам в плане он соответствует $\frac{1}{4}$ элементарной ячейки, которой замощена поверхность дискретно упрочненной детали. По глубине фрагмент ограничен 10-ю размерами характерного размера в плане. По боковым поверхностям фрагмента заданы условия симметрии, нижняя грань закреплена, верхняя – нагружена равномерно распределенным давлением $p = 100$ МПа, а по сопряженным граням моделируются условия контактного взаимодействия без трения.

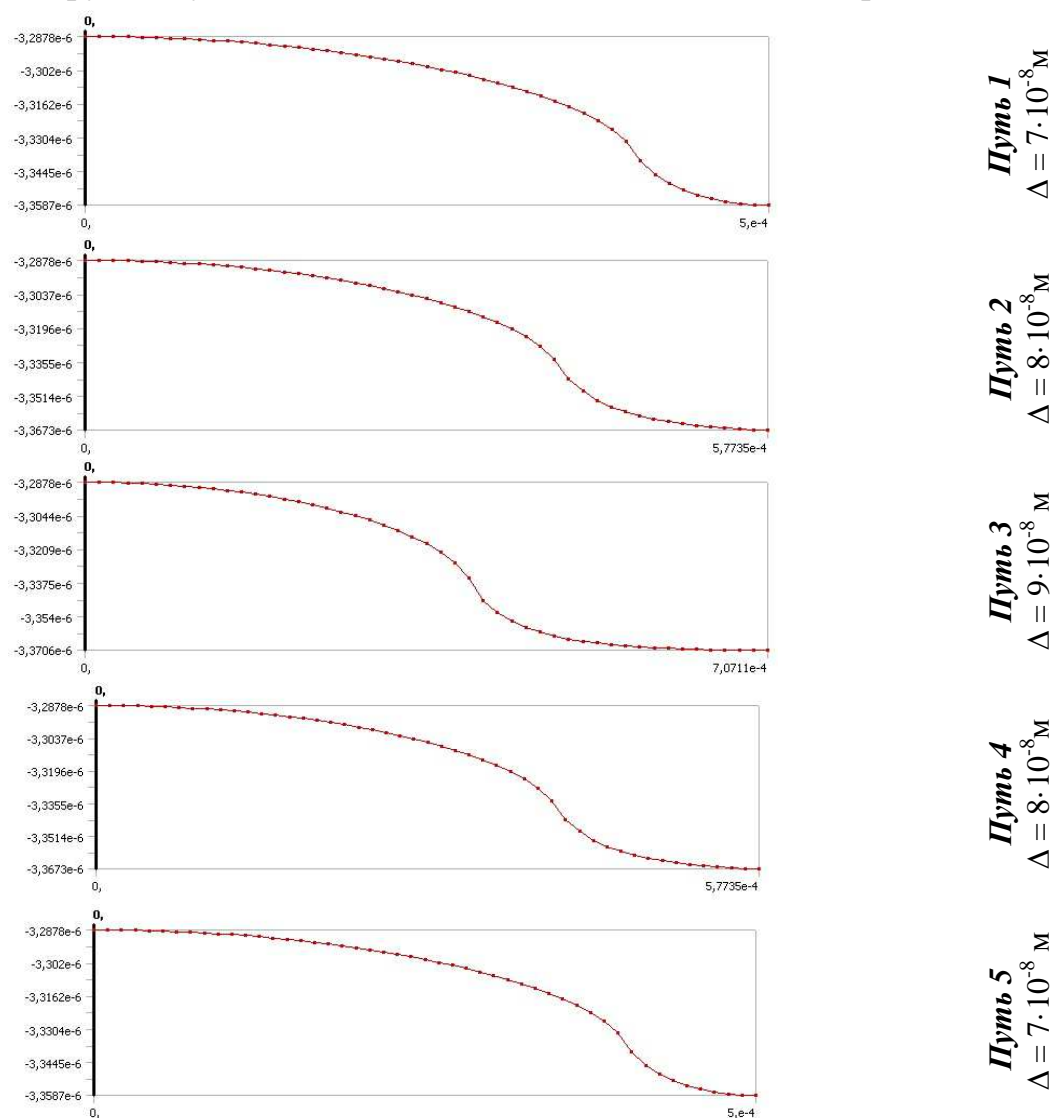


Рис. 4.11 – Распределение профилей деформированной поверхности вдоль путей 1-5 (см. рис. 4.10)

На рис. 4.11 – 4.13 (см. цветн. вклейку) представлены картины распределения компонент напряженно-деформированного состояния в исследованном фрагменте системы взаимодействующей тел, одно из которых содержит зону дискретного упрочнения.

Представленные картины распределения контактных давлений свидетельствуют о существенной их неравномерности. При этом большая часть действующей нагрузки прижатия тел, приходящаяся на отдельно взятый фрагмент, содержащий одну зону дискретного упрочненного материала, передается через эту зону.

В области контакта неупрочненного материала с неупрочненным материалом другой детали контактные давления намного ниже. Соответственно, в этой области – более благоприятные условия для аккумуляции смазочного материала, циркулирующего в лабиринте между зонами дискретного упрочнения.

Принимая во внимание, что поверхность зоны дискретного упрочнения имеет низкий коэффициент трения в сопряжении с поверхностью основного материала, получаем в итоге выигрыш по интегральному значению усилий трения. Кроме того, за счет более высоких механических свойств легированного материала зоны дискретного упрочнения (по сравнению со свойствами основного материала) некоторое увеличение действующих в ней напряжений (по сравнению со случаем отсутствия зон дискретного упрочнения) нивелируется с точки зрения прочности. В дополнение можно отметить также, что верхний слой материала зон дискретного упрочнения, содержащий значительные остаточные напряжения после технологической операции дискретного упрочнения, удаляется путем шлифования. Это значит, что в итоге снижается уровень суммарных напряжений (от внешних усилий и от остаточного напряженного состояния). В качестве окончательного результата получается улучшение и трибологических, и прочностных характеристик.

Описанные результаты численных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанные конечно-элементные модели характеризуются адаптированностью к анализу и синтезу принципиально новых способов упрочнения высоконагруженных элементов двигателей внутреннего сгорания и других машиностроительных конструкций, что качественно отличает их от построенных традиционными способами.

2. Проведенные численные исследования позволили обнаружить два эффекта, названных « Δ -эффект» и « σ -эффект». Первый из них заключается в позитивном характере изменения деформированного профиля в контакте упрочненного элемента машины с сопряженными элементами. Второй эффект заключается в создании благоприятного напряженного состояния после упрочнения исследуемого объекта с применением новой дискретно-континуальной технологии, которые после наложения на распределение рабочих напряжений создает такое результирующее напряженное состояние, которое значительно дальше от опасного уровня, чем для неупрочненных

деталей машин.

3. На уровне микроструктуры установлено, что контактное взаимодействие осуществляется по всей площади соприкосновения деталей, однако нормальные усилия передаются в основном через зоны дискретного упрочнения. Вследствие взаимного движения контактирующих деталей в зоне их сопряжения возникают усилия трения, которые таким образом, неравномерно в этой зоне распределяются.

В свою очередь, неравномерным будет и износ. Перечисленные факторы создают позитивные тенденции во всем комплексе трибомеханических характеристик в зоне взаимодействия деталей, одна из которых подвергнута дискретному упрочнению.

Литература к разделу 4

1. Ткачук Н.А. Повышение прочностных и трибомеханических характеристик элементов машиностроительных конструкций на основе комбинированных методов упрочнения приповерхностных слоев / Н.А. Ткачук, О.В. Веретельник, А.В. Грабовский, С.А. Кравченко, С.Ю. Белик // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукр. научно-техн. журнал. – Х. : НТУ "ХПИ", 2014. – №1. – С. 54-62.

2. Ткачук Н.А. Численное моделирование контактного взаимодействия деталей ДВС, изготовленных с применением комбинированных технологий / Н.А. Ткачук, О.В. Веретельник, А.В. Грабовский, С.А. Кравченко, С.Ю. Белик // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукр. научно-техн. журнал. – Х. : НТУ "ХПИ", 2014. – № 2. – С. 63-67.

3. Кравченко С. Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения / С. Кравченко, Е. Посвятенко, М. Ткачук, О. Веретельник // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014 – S. 269-280.

РАЗДЕЛ 5

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА И ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ДВС ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ И ТЕПЛОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

Основное количество механической энергии вырабатывают двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые в своем большинстве потребляют топливо нефтяного происхождения. Резкое обострение мировых проблем из-за истощения природных ресурсов и загрязнения окружающей среды требует усовершенствования конструкции двигателей с целью повышения их экономичности, уменьшения вредных выбросов, повышения удельной мощности и увеличения ресурса. Одним из направлений улучшения показателей топливной экономичности является создание двигателей с повышенной тепловой защитой камеры сгорания (КС). Попытки создания адиабатных двигателей потерпели неудачу. Делались попытки теплоизоляции деталей КС путем применения жаровых и керамических накладок, экранов.

Теплоизоляция КС низкотеплопроводными накладками привела к усложнению конструкции деталей КС и ухудшению эффективности работы двигателей, а нанесение теплозащитных покрытий на рабочую поверхность поршня в ряде случаев показало высокую эффективность. Создание на поверхности поршней из алюминиевых сплавов оксидного слоя обеспечивает надежную тепловую защиту, защиту от износа цилиндрической части поршней, от поломки кольцевых перемычек и т.п.. При этом снижается удельный расход топлива, улучшаются условия запуска двигателя, снижаются потери теплоты в окружающую среду, требования к сорту топлива, жесткость работы двигателя, температура поршня, повышается индикаторный КПД.

Таким образом, на примере ДВС можно рассмотреть прогрессивную технологию континуального упрочнения как высокоэффективного способа повышения триботехнических свойств поверхностей трущихся деталей.

5.1. Применение керамики для теплоизоляции камеры сгорания ДВС

Резервы повышения эксплуатационного расхода топлива и экологического совершенства двигателей за счет улучшения конструкции существенным образом сократились, и основное внимание при создании двигателей отводится обеспечению максимального теплоиспользования и снижению тепловых потерь в окружающую среду. Улучшение теплоиспользования добиваются путём повышения эффективности выделения тепла в каме-

ре сгорания, а снижения тепловых потерь добиваются применением теплоизоляторов.

Рост форсирования двигателей сопровождается увеличением механических и тепловых нагрузок на детали и влияет на ресурс и надежность, которые в основном зависят от повреждения поршней, износа гильз цилиндров и шеек коленчатого вала. При повышении температуры поршня снижаются механические свойства материала поршня, а неравномерное температурное поле в разных сечениях поршня вызывает значительные термические напряжения и неравномерную деформацию. Это является главной причиной сокращения срока службы поршня и поршневых колец. На поршнях растрескиваются края камер сгорания, происходит износ и поломка кольцевых перемычек, появляются задиры на цилиндрической части и схватывание с гильзой цилиндра. В основном от работоспособности деталей цилиндро-поршневой группы зависит и ресурс двигателя, и технико-экономические показатели, и показатели токсичности.

Учитывая необходимость дальнейшего форсирования двигателей, для обеспечения нормальной работоспособности поршней и поршневых колец при более высоких температурах в камере сгорания начали применять частичную теплоизоляцию деталей ЦПГ. С целью снижения температурного уровня деталей ЦПГ применяют охлаждение деталей. Но это вынужденная мера. Желательно не увеличивать теплоотвод от деталей камеры сгорания, а уменьшить подведение тепла от газа к стенкам камеры сгорания. Для ограничения потерь теплоты рабочего тела через стенки КС применяются теплоизолирующие жаровые накладки, жаровые кольца, экраны, применяют керметы или керамические покрытия, которые обладают высокой теплоустойчивостью, твердостью и износостойкостью и не требуют изменения конструкции деталей. Это приводит к уменьшению влияния тепловых нагрузок на ресурс и надежность двигателя. При работе ДВС на форсированных режимах увеличивается плотность тепловых потоков, которые проходят через элементы камеры сгорания и особенно через донышко поршня, что в значительной мере снижает его ресурс. Для тепловой защиты поршней применяются низкотеплопроводные вставки, теплозащитные покрытия.

Японская фирма Kyoto Ceramic изготовила почти целиком керамический двигатель из спеченного оксида кремния. Из этой керамики сделаны цилиндры, поршни, огневое днище головки цилиндров, толкатель, коромысла, наконечники штанг, заглушки поршневых пальцев. Однако керамические детали ломаются при перетяжке болтов, при падении, при неравномерном нагреве [1].

Фирма Cummins Engine Co (США) создала турбокомпаундный дизель

ТА400 с керамической внешней изоляцией цилиндра, керамической накладкой на поршень, керамическим днищем головки цилиндров, керамической накладкой на тарелке выпускного клапана, керамической вставкой в выпускном канале.

Применение керметов для изоляции деталей исследуется фирмой Fiat [2]. Некоторые свойства керметов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Свойства керметов

Материал покрытия	Микро твердость 10^4 МПа	Прочность при изгибе 10^2 МПа	Прочность при сжатии 10^2 МПа	Коэффициент линейного термического расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, $1/^\circ\text{C}$
Al_2O_3 95 % корунд	1,8–2,4	2,8	15,0–18,0	8,0–8,5
SiO_2 ситал 60 %	0,9	1,4	17,2	7,3–8,5
SiC карбид кремния	2,0–3,5	1,6	22,5	5,2
Si_3N_4 нитрид кремния	1,6–2,0	5,0	4,7	9,2

Детали изготавливают из двуокиси кремния, SiO_2 , карбидов SiC , V_4C , нитридов Si_3N_4 , BN , силицидов бора SiB_4 , SiB_6 , сиалонов – спеченной смеси Si_3N_4 , Al_2O_3 такими способами:

- способом реакционного спекания (формование, азотизация при $t = 1400^\circ\text{C}$);
- горячим прессованием;
- комбинированными способами.

Примеры конструкций поршней с теплоизолирующими накладками приведены на рис. 5.1.

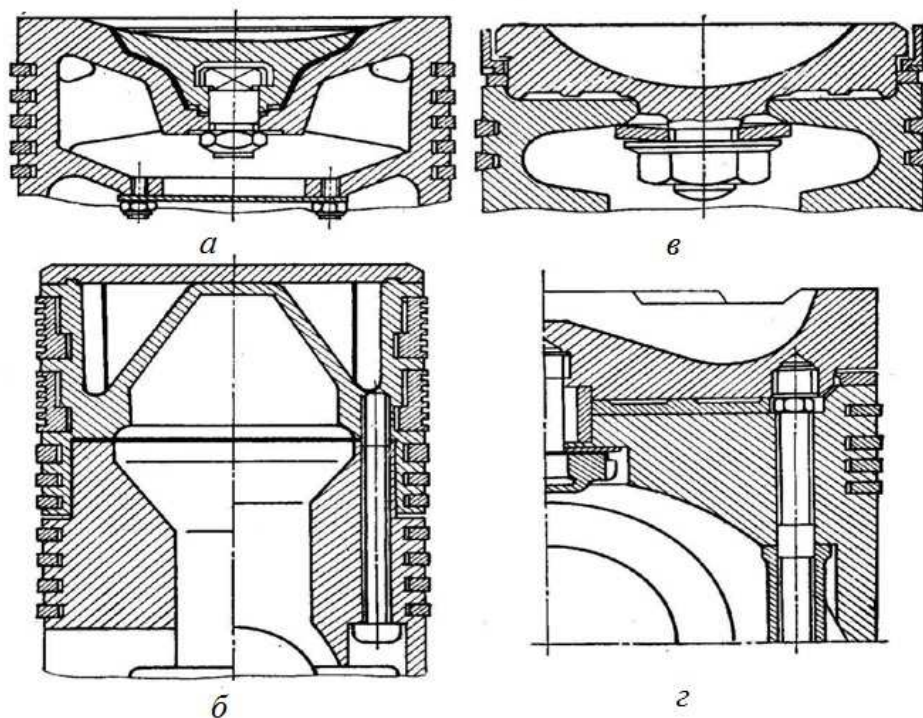


Рис. 5.1 – Конструкции поршней с теплоизолирующими накладками

При работе двигателя с теплоизолирующими накладками температурный уровень поршня снижается, а жаровая накладка разогревается до среднецикловой температуры 600–700 °С. Но эти решения не находят широкого применения в промышленности или из-за усложнения конструкции поршня, или из-за отслаивания покрытия от огневой поверхности поршня. Кроме того, накладная керамика и напыленный керамический поверхностный слой не выдерживают продолжительных динамических нагрузок.

На деталях из алюминиевых сплавов получают плавленные или спечённые покрытия способами микродугового или дугового оксидирования. Метод микродугового оксидирования (МДО) позволяет получить на металлах покрытия с высокими механическими свойствами, теплостойкие, стойкие к коррозии и износу, с высокой прочностью сцепления с основным металлом. Известно несколько разновидностей МДО:

- анодное МДО на постоянном токе для получения оксидных покрытий на вентильных металлах;
- анодное стабилизированное МДО на переменном токе для ускоренного формирования оксидных покрытий;
- МДО с анодным пульсирующим режимом для получения покрытий на алюминиевых сплавах, титане;
- МДО с анодным пульсирующим режимом с наложением обратных токовых импульсов для получения толстых (до $1 \cdot 10^{-3}$ м) силикатных покрытий на металлах и сплавах;
- МДО с анодным импульсным режимом для анодирования стальных деталей;
- анодно-катодное МДО для получения высокоизносостойкого и твёрдого керамического покрытия или слоя на алюминии и его сплавах;
- гальвано-плазменное корундирование для получения высокопрочных, износостойких, теплостойких покрытий или корундового керамического слоя на деталях из алюминиевых сплавов в ускоренном режиме;
- анодное МДО с электрофорезом для нанесения дешёвых износостойких, теплостойких и коррозионно-стойких покрытий;
- анодно-катодное МДО в соединении с электрофорезом для получения высокопрочных теплостойких покрытий толщиной до $1 \cdot 10^{-3}$ м;
- дуговой электрофорез для нанесения покрытий в режиме дугового разряда.

Вместе с тем в технической литературе не приведено обоснований относительно рационального использования конкретного метода МДО для

улучшения свойств деталей ДВС и в том числе деталей ЦПГ.

5.2. Влияние теплоизоляции на температуру поршня

Высокая температура стенок камеры сгорания обуславливает уменьшение скорости нарастания давления и нетребовательность дизеля к характеристикам топлива, а снижение температуры поршня увеличивает его ресурс. На дизеле Д70 накладки из стали 08X18H10T с прокладкой из стали 40 позволили снизить температуру над первым кольцом на 65 °С, при этом максимальная температура КС увеличилась на 260 °С [2]. Применение тонкого экрана толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ м из стали 08X18H10T на неохлаждаемом чугуном поршне дизеля 4Ч18/24 привело к снижению температуры тела поршня на 20 °С [3]. Однако применение накладок, колец, экранов усложняет конструкцию, увеличивает массу поршня и уменьшает его надежность. Поэтому для теплоизоляции начали применять теплозащитные покрытия, которые наносятся плазменным или газопламенным методами. Наилучшими материалами для покрытий оказались окись алюминия и двуокись циркония. Известны результаты исследований многих авторов эффективности керамических покрытий для снижения температуры тела поршня дизелей с керамическим покрытием доньшка поршня. Отдельные обобщенные результаты этих исследований приведены в табл. 5.2 [3].

Экспериментально подтверждено, что применение покрытия толщиной от $0,2 \cdot 10^{-3}$ до $0,8 \cdot 10^{-3}$ м позволяет снизить температуру тела головки поршня на 20–50 °С, а зоны над первым кольцом – на 10–25 °С.

При покрытии алюминиевых поршней окисью алюминия Al_2O_3 толщиной $0,3 \cdot 10^{-3}$ м двигателя 1Ч 10,5/13 температура в центре доньшка снизилась на 35 °С, а над первым поршневым кольцом – на 25 °С.

Увеличение толщины покрытия до $0,8 \cdot 10^{-3}$ м позволило снизить температуру возле первого кольца только на 10 °С, а на периферии доньшка поршня на 15 °С.

Аналогичная картина наблюдается и при покрытии алюминиевого поршня окисью циркония ZrO_2 . При толщине покрытия $0,3 \cdot 10^{-3}$ м снижение температуры возле первого поршневого кольца составляет 40 °С, а увеличение толщины покрытия до $0,4 \cdot 10^{-3}$ м снижает температуру только на 25 °С [4].

При испытании тепловозного дизеля Д100 с керамическим покрытием поршня (Al_2O_3) установлено, что температура теплонапряжённого участка головки поршня снижается на 85 °С [4]. При этом эффективность снижения температуры поршня больше на тех участках, где была более высокая тем-

пература до покрытия.

Таблица 5.2 – Влияние теплоизоляции на температуру поршня

	Режим	Покрытие поршня		Снижение температуры		
		Материал	Толщина, 10^{-3} м	Место измерения	°С	%
1Ч10,5/13	Поршень алюминиевый; $p_e = 0,1585$ МПа; $n = 1000$ мин $^{-1}$	Al ₂ O ₃	0,3	центр донышка над первым кольцом	35 25	10 12
	Поршень чугунный; 100 % N_e^* ; $n = 1500$ мин $^{-1}$		0,6	центр донышка над первым кольцом	40 16	8,7 6,8
	Поршень алюминиевый; 100 % N_e		0,8	периферия донышка возле первого кольца	15 10	7,3 5,5
2ЧН26/26	Поршень алюминиевый; режимы винтовой характеристики	ZrO ₂	0,3	наиболее нагретая точка	25-40	15
	Поршень алюминиевый; 100 % N_e			возле первого кольца	40	14
	Поршень алюминиевый; $p_e = 1,3$ МПа; $n = 1000$ мин $^{-1}$		0,4	над первым кольцом	25	9
	Поршень алюминиевый; $p_e = 1,58$ МПа; $n = 700$ мин $^{-1}$			над первым кольцом	25	8
2Д100	Поршень чугунный, охлаждаемый		0,2-0,25	периферия донышка донышко	30 50	7,5 10,4
Д20	Поршень алюминиевый; $p_e = 0,592$ МПа; $n = 1600$ мин $^{-1}$	Al ₂ O ₃	0,45-0,5	наиболее нагретая точка радиальный перепад	31 20	– 33

* N_e – эффективная мощность

Таким образом, керамическое покрытие оказывает содействие выравниванию температурного поля головки поршня и уменьшению соответствующих термических напряжений.

Также установлено, что покрытие толщиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м снижает температуру тела поршня на 45–50 °С, толщиной до $0,2 \cdot 10^{-3}$ м дополнительно снижает температуру на 20 °С, а увеличение слоя керамики от $0,8 \cdot 10^{-3}$ м до $0,9 \cdot 10^{-3}$ м дополнительно снижает температуру только на 5 °С. Это означает, что с ростом толщины покрытия тепловое сопротивление возрастает, но не пропорционально толщине покрытия. Теплоизоляция поршня не только увеличивает температуру стенок КС, снижает температуру под покрытием и тер-

мические напряжения, но и уменьшает теплоотвод в систему охлаждения.

Результаты испытаний дизеля 1Ч18/22 с покрытием из оксида алюминия деталей КС позволили установить, что наибольшее снижение температуры охлаждающей жидкости достигается с покрытием только одной детали – поршня. При этом происходит снижение температуры детали с покрытием и незначительное повышение температуры других деталей.

В исследовании [5] показано, что при теплоизоляции доньшка поршня дизеля Ч 24/36 температура тела поршня снижается в зависимости от нагрузки (рис. 5.2).

В этом исследовании отмечается, что значительное влияние на температурное состояние поршня с тепловой изоляцией имеют процессы смесеобразования и сгорания.

При угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}=15^\circ$ гр. п.к.в. снижение температуры поршня составляет 3–5 °С, а при $\varphi_{оп}=19^\circ$ гр. п.к.в. температура поршня снижается на 20–25 °С по всей нагрузочной характеристике (рис. 5.3).

На рисунке 5.4 показана зависимость снижения температуры поршня с покрытием от угла опережения подачи топлива при нагрузках 40 и 80 % от номинальной. На основании этого делается вывод о необходимости выбора оптимального угла опережения подачи топлива, в том числе и с целью уменьшения температуры тела поршня.

Исследования температур поршня двигателя Д20 [6] показали, что твердость материала поршня из сплава АК-4 за первые 50 часов работы двигателя в зоне колец снижается на 29 ед. по Бринелю.

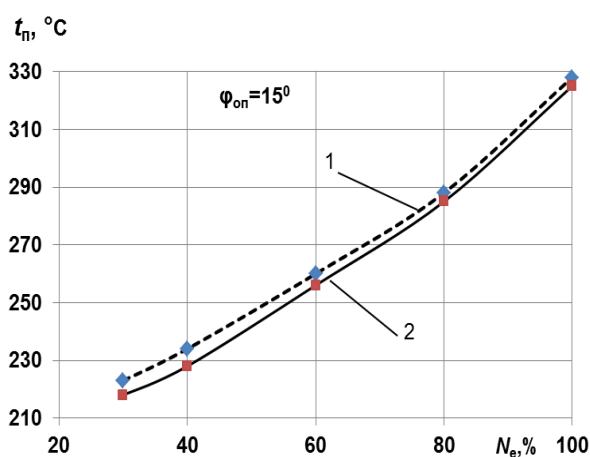


Рис. 5.2 – Температура поршня в зависимости от нагрузки при угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}=15^\circ$: 1 — поршень без покрытия; 2 — поршень с покрытием

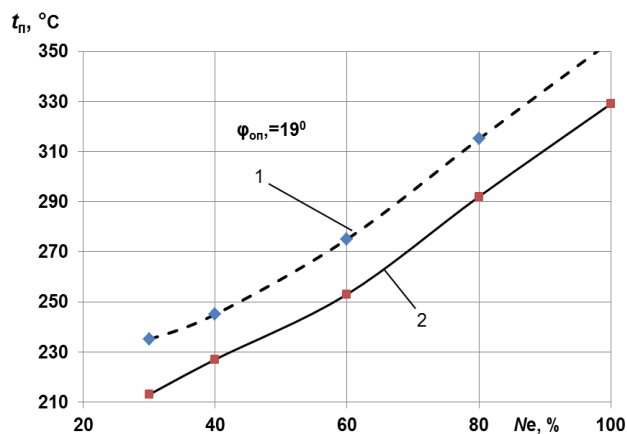


Рис. 5.3 – Температура поршня в зависимости от нагрузки при угле опережения подачи топлива $\varphi_{оп}=19^\circ$: 1 — поршень без покрытия; 2 — поршень с покрытием

Это приводит к повышенному износу опорной поверхности канавки верхнего компрессионного кольца.

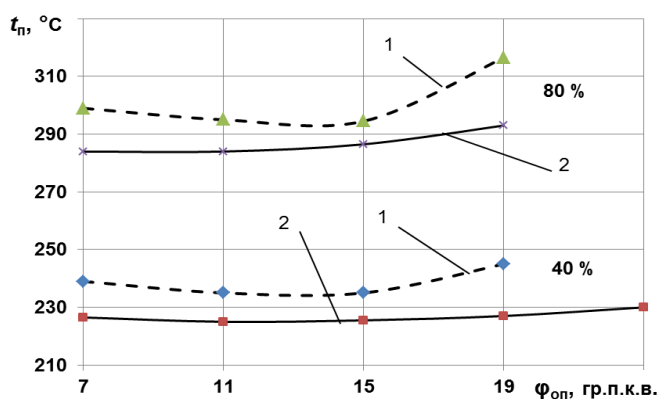


Рис. 5.4 – Температура поршня дизеля Ч 24/36 при нагрузке 40 и 80 % от номинальной: 1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием

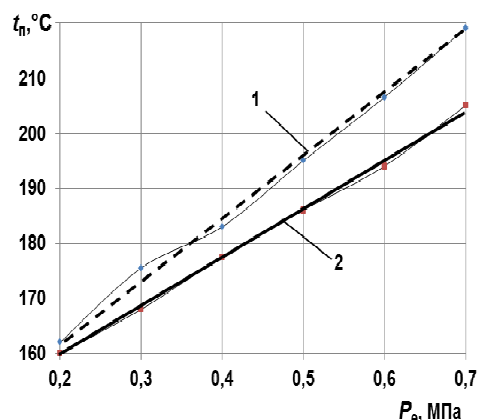


Рис. 5.5 – Изменение температуры поршня двигателя Д20 в зоне верхнего поршневого кольца в зависимости от нагрузки: 1 – поршень серийный; 2 – поршень опытный

Применение термоизолирующего эмалированного керамического покрытия (рис. 5.5), толщиной $0,35 \cdot 10^{-3}$ м, нанесенного плазменным способом [6], позволило, по сравнению с серийным поршнем, снизить температуру при разных нагрузках в зоне верхнего поршневого кольца (рис. 5.6) на 8-14 $^\circ\text{C}$, а на скоростных режимах на 13–16 $^\circ\text{C}$.

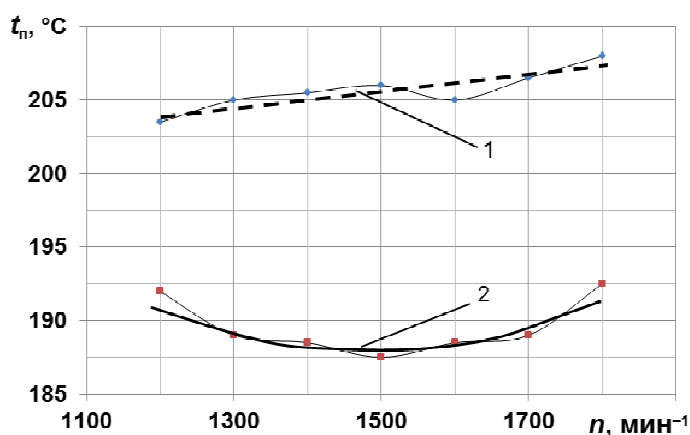


Рис. 5.6 – Изменение температуры поршня двигателя Д20 в зоне верхнего поршневого кольца в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя: 1 – поршень серийный; 2 – поршень опытный (экспериментальные кривые показаны тонкими линиями)

Таким образом, многими исследованиями доказано, что износостойкие и теплостойкие покрытия в значительной мере влияют на температуру тела поршня в разных его точках. При этом чрезвычайно важным является уменьшение температуры в зоне первого поршневого кольца, которое, безусловно, положительно влияет на ресурс ДВС.

5.3. Влияние теплоизоляции на расход топлива

Одной из актуальных проблем современного двигателестроения является уменьшение удельного расхода топлива. В результате поиска путей снижения расхода топлива в двигателях внутреннего сгорания некоторые

исследователи пророчили 30-процентную экономию топлива в двигателях из керамических материалов или при применении теплоизоляции стенок камеры сгорания [7, 8].

Другие исследователи [9] экспериментально и путём численного моделирования получили значительное увеличение расхода топлива, приблизительно на $15 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ при полной нагрузке двигателя с поршнем, теплоизолированным слоем керамики толщиной $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, которая имеет коэффициент теплопроводности $2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Температура головки теплоизолированного поршня при полной нагрузке дизеля без наддува достигла 800°C , тогда как для варианта без теплоизоляции – 250°C . Негативное влияние теплоизоляции на эффективность работы двигателя объясняется следующим. В процессе выпуска происходит подогрев воздушного заряда, который значительно уменьшает коэффициент наполнения, повышается удельная теплоемкость топливной смеси, что и приводит к увеличению удельного расхода топлива. Также причиной такого увеличения расхода топлива (вместо ожидаемого уменьшения), по мнению исследователей, есть конвективное ускорение теплопередачи от пламени к поршню при повышении температуры поверхности во время периода воспламенения. Происходит так называемый конвективный всплеск. Возникает более крутой градиент температуры в поверхности поршня, а с ростом температуры поверхности теплоизоляции повышается коэффициент теплопроводности. И несмотря на снижение полного (по циклу) теплового потока в детали камеры сгорания, расход топлива увеличивается. Авторами сделан вывод, что теплоизоляция поршня увеличивает температуру поверхности поршня и уменьшает разность между температурой газа и поверхностью. Это снижает тепловой поток, но при этом одновременно увеличивается коэффициент теплопроводности, который приводит к увеличению теплового потока в поршень. Превосходящее влияние первого или второго фактора сильно зависит от величины температуры поверхности. Значит, при определенной температуре поверхности теплоизоляция не будет иметь никакого влияния на рабочий цикл, потому что уменьшение температурного перепада между газом и теплоизолированной поверхностью будет компенсироваться ростом коэффициента теплопроводности.

В работе [10] отмечается, что с увеличением толщины теплоизолятора приблизительно от $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ температура поверхности поршня увеличивается от 300 до 1300 К . И возможен случай, когда с увеличением теплоизоляции полный тепловой поток в поршень возрастет. На рис. 5.7 приведен график удельного расхода топлива и толщины применяемой теплоизоляции как функции средней температуры поверхности поршня. Видно, что с увеличением средней температуры поверхности головки поршня

от 500 до 1200 К расход топлива увеличивается.

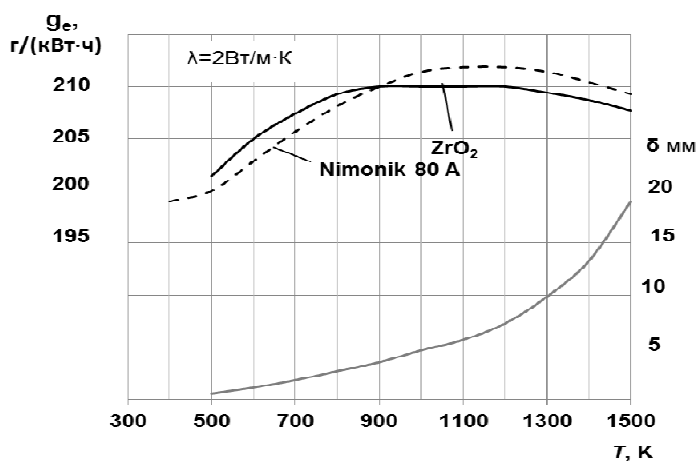


Рис. 5.7 – Расход топлива (верхние кривые) в зависимости от средней температуры поверхности головки поршня и толщина применяемой теплоизоляции (нижняя кривая)

На основании приведенных исследований профессор Герхард Вошни сделал вывод о том, что применение теплоизоляции поверхности камеры сгорания в поршне приводит к увеличению расхода топлива.

Делая такой вывод для толщин теплоизоляции от $2 \cdot 10^{-3}$ м до $20 \cdot 10^{-3}$ м, Г. Вошни тем не менее показал, что при малых толщинах теплоизоляции происходит снижение расхода топлива и повышается эффективность работы двигателя. Однако исследований при толщине теплозащитного слоя менее $1 \cdot 10^{-3}$ м не проводилось [9].

Для наглядности на рисунке 5.8 показан график зависимости расхода топлива, а на рисунке 5.9 – средней температуры поверхности поршня от толщины применяемой теплоизоляции (соответственно рисунку 5.7), так как именно толщина применяемой теплоизоляции влияет на перечисленные параметры. При применении теплоизоляции толщиной менее $2 \cdot 10^{-3}$ м на графике рисунка 5.8 прослеживается тенденция снижения расхода топлива.

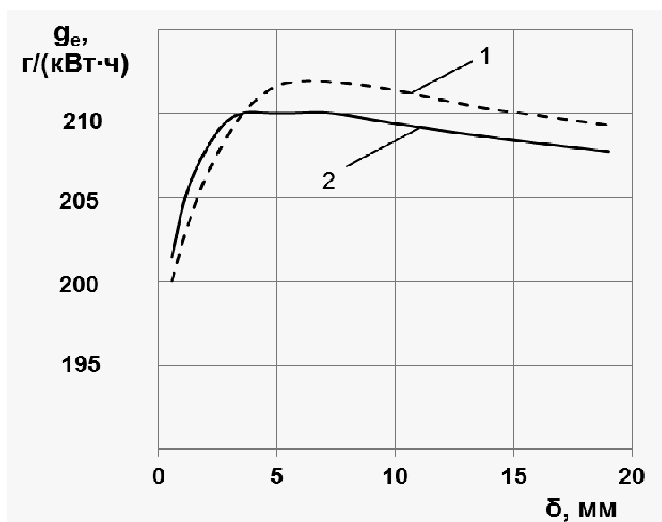


Рис. 5.8 – Зависимость удельного расхода топлива от толщины применяемой теплоизоляции: 1 – измеренный расход топлива; 2 – расчетный расход топлива

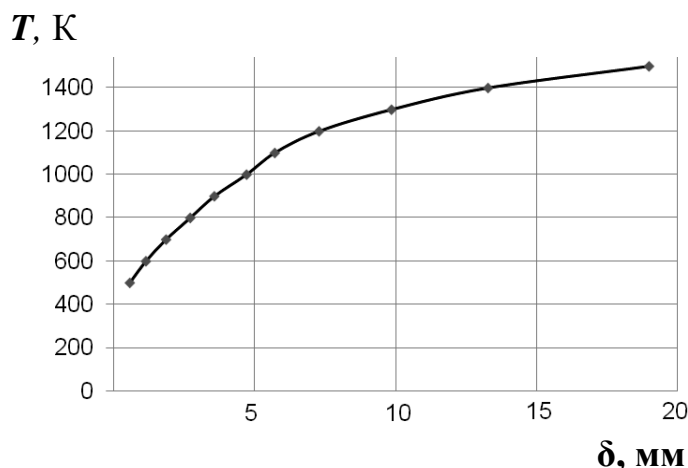


Рис. 5.9 – Зависимость средней температуры поверхности поршня от толщины применяемой теплоизоляции

Ученые Х. Валланд, Ж. Виспянски, Ф. Воллас, Т. Као, В. Александер, А. Коль, и М. Тарабад университета г. Бат, Великобритания [11, 12], доказали в результате исследований теплоизоляции КС, что покрытие деталей КС слоем циркония толщиной $6 \cdot 10^{-3}$ м уменьшает потери тепловой энергии в охлаждающую жидкость и снижает удельный расход топлива на 5,5 % у двухтактного двигателя и на 1,8 % – у четырехтактного (рис. 5.10).

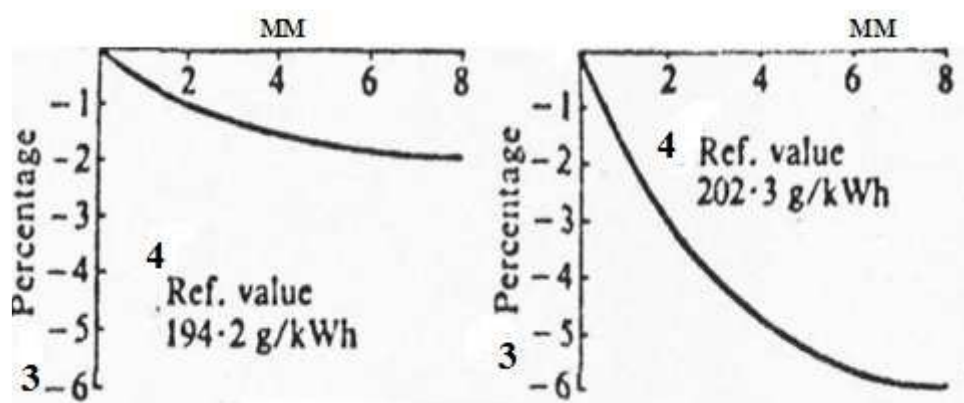


Рис. 5.10 – Зависимость среднего индикаторного расхода топлива 4- и 2-тактного двигателя от толщины покрытия

В результате исследований теплоизоляционных материалов для адиабатных двигателей был сделан вывод о том, что для получения наивыгоднейших термодинамических показателей рабочий цикл двигателя должен быть чисто адиабатным, т.е. температура стенок КС должна изменяться вслед за изменением температуры газа на протяжении всего цикла. Безусловно, это идеальный случай. На практике же тепловой поток будет направлен от газа до стенки или от стенки до газа в зависимости от мгновенной температуры газа, которая может быть выше или ниже температуры стенки КС.

Расчетные исследования тепловой изоляции поршня, которые были выполнены с учетом тепловой инерции циркония $B = \lambda \rho c = 3,5 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{г} / \text{с}^4 \cdot \text{К}$ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ показали амплитуду изменения температуры 100°C (рис. 5.11).

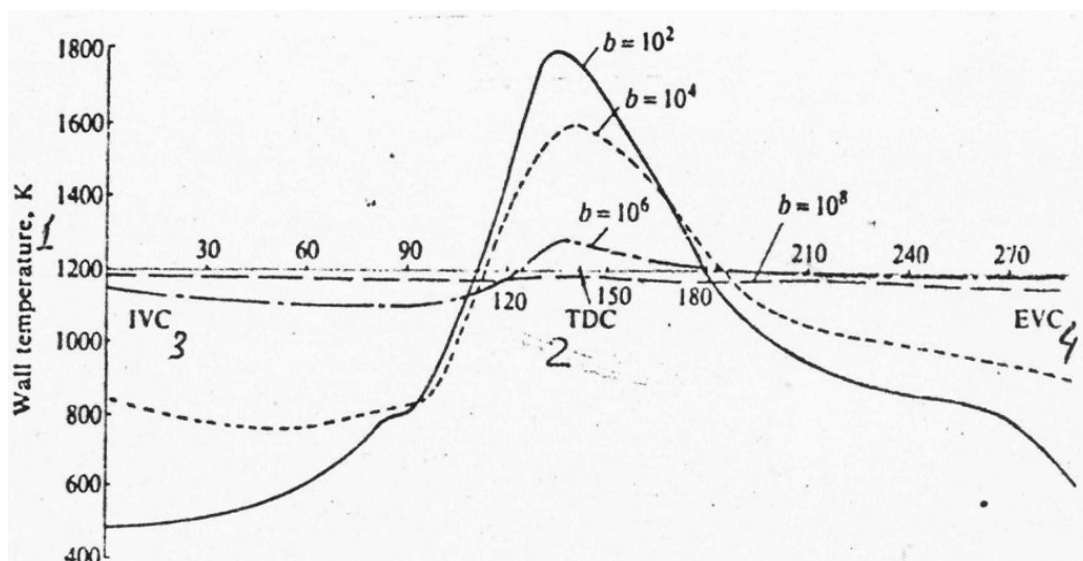


Рис. 5.11 – Колебание температуры поверхности КС с теплоизоляцией: $b = 10^2$ – тепло-изолятор-воздух, $b = 10^4$ – окись алюминия; $b = 10^6$ – цирконий, $b = 10^8$ – сталь

На основании анализа этих и других результатов исследований был сделан общий вывод: чисто адиабатный режим работы двигателя не может быть достигнут ни при какой реальной конструкции стенок КС. Кроме того, значительное увеличение КПД (до 10 %) может быть получено при частичной тепловой изоляции КС [11, 12].

Экспериментальные исследования на дизелях, оснащенных поршнями с керамическим покрытием толщиной $(0,2-0,9) \cdot 10^{-3}$ м, продемонстрировали снижение эффективного расхода топлива на 10–13 г/(кВт·ч) за счет более полного сгорания и уменьшения потерь теплоты [13, 14]. Здесь же подчеркивается, что эффективный расход топлива с покрытиями в большей мере зависит от характера процесса сгорания, чем от непроизводительных потерь теплоты. А процесс сгорания зависит от температуры поверхностей камеры сгорания и от процесса смесеобразования. Умеренное повышение температуры поверхности поршня с покрытием улучшает экономичность дизеля. Делается вывод о том, что для дизеля с наддувом существует оптимальная температура поверхности покрытия, которая обеспечивает наиболее эффективный процесс сгорания.

Так, для дизеля 1ЧН 25/34 (рис. 5.12) наибольшее улучшение экономичности обеспечивает покрытие из окиси алюминия толщиной $(0,2-0,5) \cdot 10^{-3}$ м [5].

Экспериментальное определение температур поверхности поршня при применении эмалированного керамического покрытия толщиной $0,35 \cdot 10^{-3}$ м, нанесенного плазменным способом на доньшко КС поршня двигателя Д20 [6], показали, что температурные кривые во всех точках за-

мера расположены выше, чем у серийного поршня по всей нагрузочной характеристике (рис. 5.13), а также при изменении частоты оборотов коленчатого вала (рис. 5.14).

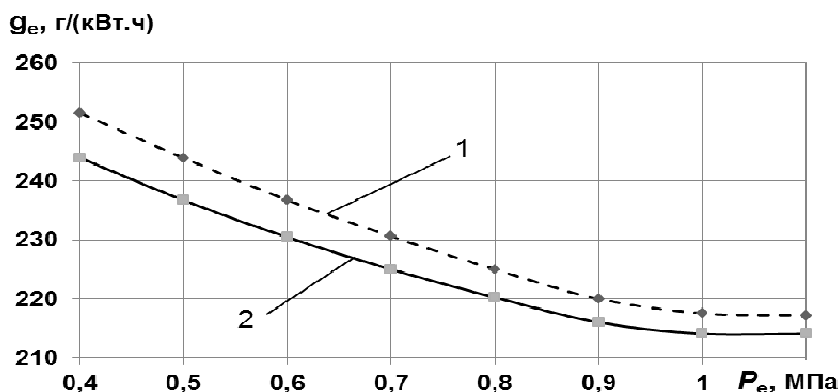


Рис. 5.12 – Зависимость удельного расхода топлива дизеля 1ЧН 25/34 от нагрузки [5]:
1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием

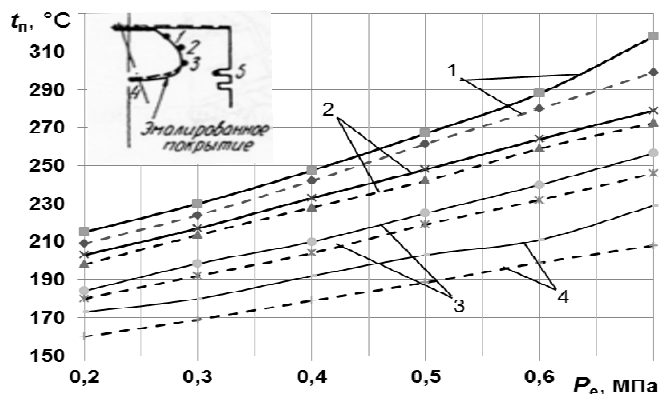


Рис. 5.13 – Изменение температуры поверхности поршня в зависимости от нагрузки двигателя Д20: --- поршень серийный; — поршень опытный [6]; 1, 2, 3, 4 – номер точки замера температур

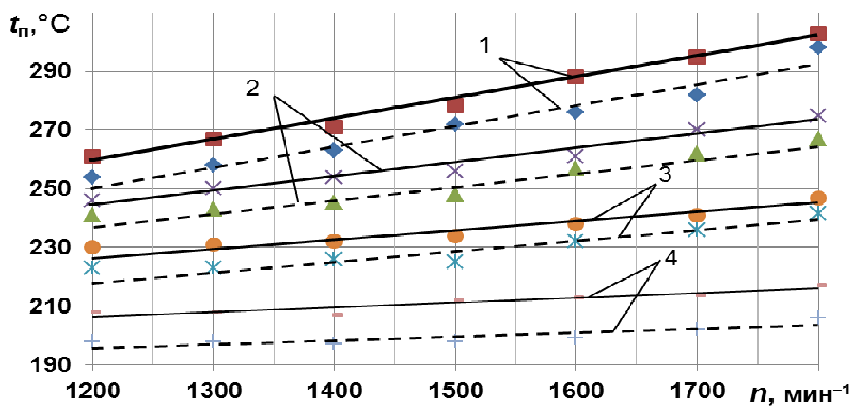


Рис. 5.14 – Изменение температуры поверхности поршня в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя Д20: --- поршень серийный; — поршень опытный [6]; 1, 2, 3, 4 – номер точки замера температуры

Температура вблизи кромки камеры сгорания повышается на 10 °C и достигает значений 260 – 300 °C. Наибольшее повышение температуры поверхности наблюдается в центре камеры сгорания поршня. Температура поверхности повышается на 14 – 15 °C.

Изменение температурного режима двигателя Д20 привело к снижению эффективного удельного расхода топлива на 4 – 8 г/(кВт·ч) (рис. 5.15, 5.16) и скорости нарастания давления по всей нагрузочной характеристике, уменьшению максимального давления сгорания и температуры отработанных газов.

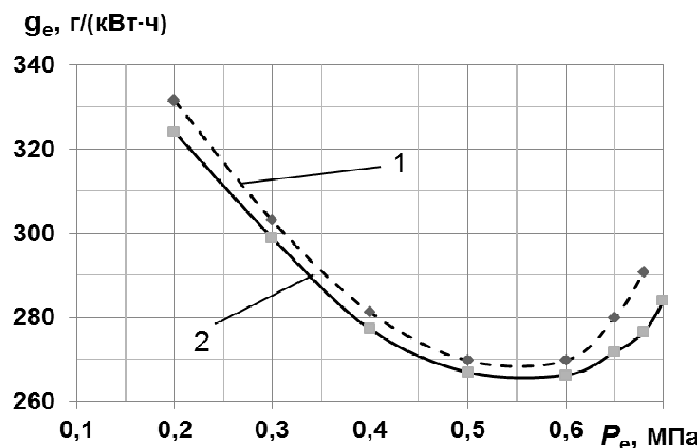


Рис. 5.15 – Изменение эффективного удельного расхода топлива двигателя Д20 в зависимости от нагрузки ($n = 1600 \text{ мин}^{-1}$) [6]: 1 – поршень серийный; 2 – поршень опытный

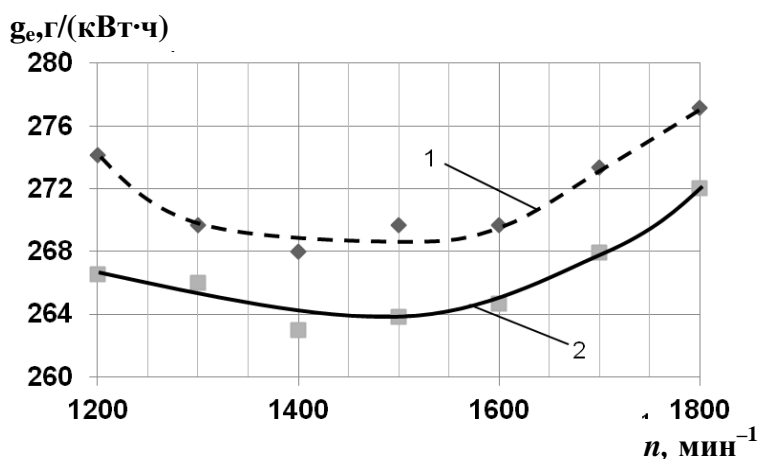


Рис. 5.16 – Изменение эффективного удельного расхода топлива двигателя Д20 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, ($P_e = 0,59 \text{ МПа}$): 1 – поршень серийный; 2 – опытный поршень

При использовании оксидных керамических покрытий [15] для тепловой защиты рабочих поверхностей деталей цилиндро-поршневой группы двухтактного двигателя внутреннего сгорания были улучшены основные характеристики двигателя.

Благодаря использованию керамического покрытия на поршне и головке цилиндра толщиной около $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ уменьшился теплоотвод, повысилась максимальная температура в камере сгорания, на 6 % увеличилась максимальная мощность двигателя и на 3,2 % снизился удельный расход топлива.

5.4. Влияние угла опережения подачи топлива на его расход

Значительное влияние на экономические показатели двигателя имеет угол опережения подачи топлива $\varphi_{оп}$. При испытании одноцилиндрового отсека среднеоборотного дизеля Ч 24/36 [3, 16-19] с покрытием из оксида алюминия толщиной $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ на доньшке поршня, нанесенного плазменным способом, установлено, что при разных углах опережения $\varphi_{оп} = 7, 11, 15, 19^\circ$ происходит улучшение экономичности на всех режимах нагрузки. Однако при $\varphi_{оп} = 15^\circ$, что является оптимальным для двигателя с поршнем без покрытия, экономичность улучшается только на частичных нагрузках (рис. 5.17).

При $\varphi_{оп} = 19^\circ$ значение g_e для поршня с покрытием еще ниже, чем при $\varphi_{оп} = 15^\circ$. То есть оптимальное значение угла опережения подачи топлива

для теплоизолированного поршня смещается в сторону больших углов $\varphi_{оп}$. На основании приведенных результатов исследований можно сделать вывод, что у двигателя с теплоизолированным поршнем при $\varphi_{оп} = 19^\circ$ получено значительное снижение g_e , примерно на 15–20 г/(кВт·ч), а при $\varphi_{оп} = 15^\circ$ вывод был бы противоположным (рис. 5.17), таблица 5.2 [20].

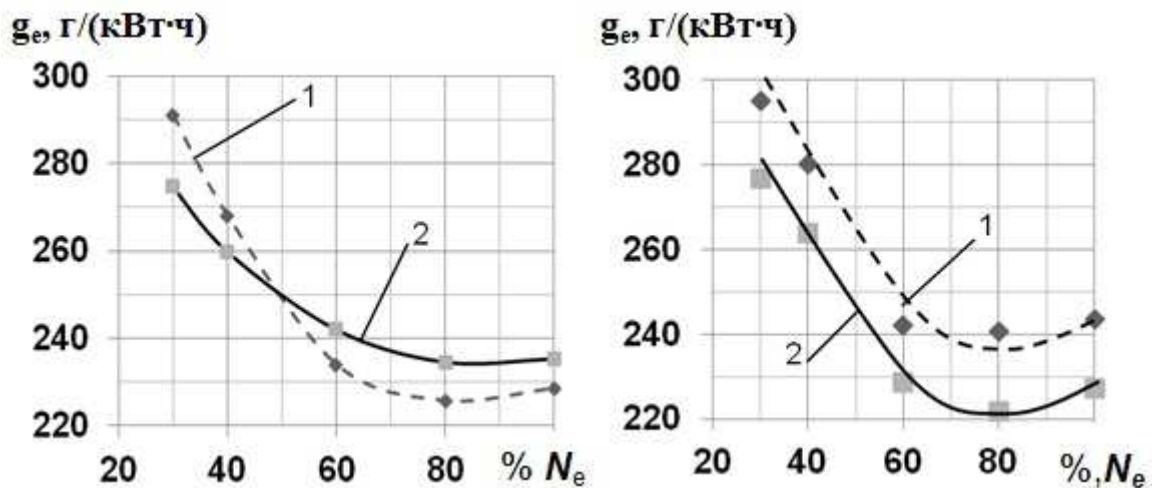


Рис. 5.17 – Изменение удельного эффективного расхода топлива дизеля Ч 24/36 в зависимости от нагрузки: 1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием

Снижение эффективного удельного расхода топлива наблюдается, независимо от нагрузки (рис. 5.18), однако при малых нагрузках снижение расхода топлива может достигать 10–15 г/(кВт·ч).

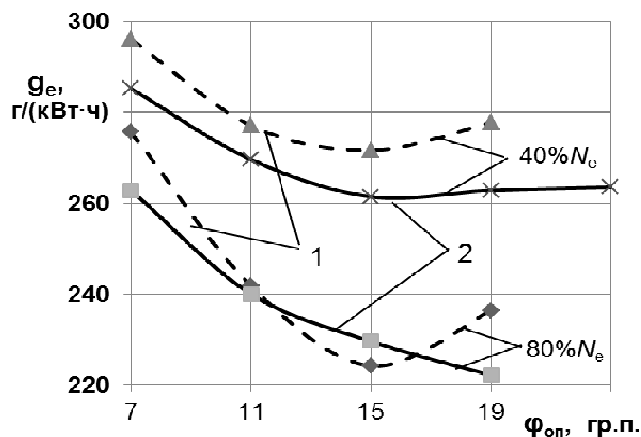


Рис. 5.18 – Регулировочные характеристики дизеля Ч 24/36 при нагрузке 40 и 80 % от номинальной: 1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием

5.5. Влияние теплостойких и износостойких покрытий деталей цилиндро-поршневой группы на показатели рабочего процесса двигателей

Теплозащитные покрытия КС уменьшают теплоотвод и позволяют лучше использовать тепло для улучшения процесса сгорания топлива и повышения эффективных и экологических показателей дизеля. Эффективный

расход топлива зависит от характера процесса сгорания, от температуры поверхностей камеры сгорания и от процесса смесеобразования.

Совершенствование процесса сгорания следует начинать из первой его стадии – предпламенной подготовки топлива с целью уменьшения продолжительности фазы предпламенных реакций (периода запаздывания самовоспламенения смеси τ_i). Задержка самовоспламенения влияет на характер сгорания топлива, скорость нарастания давления, момент достижения максимального давления и температуру рабочего тела. Так, при довольно большом τ_i происходит цепочно-тепловой взрыв, который приводит к увеличению жесткости процесса, а значит, к снижению ресурса деталей ЦПГ. При этом образуется большое количество окислов азота.

Температура деталей КС влияет на протекание рабочего процесса в дизеле, на показатели его экономичности и токсичности [21]. Поэтому согласование температур стенок КС с температурой рабочего тела имеет первостепенное значение. Это подтверждается работами других исследователей [14].

На основе имеющихся данных можно ожидать, что при теплоизоляции доньшка поршня температура и давление воздуха в камере сгорания на такте сжатия к моменту впрыскивания топлива выше, чем без теплоизоляции приблизительно на 70° и 0,3 МПа соответственно.

Глубокие исследования влияния теплоизоляции поршня на рабочий процесс описаны в работах [3, 5]. Методом плазменного напыления на поршне из алюминиевых сплавов наносились покрытия из оксида алюминия. Исследования были проведены на дизелях Ч 24/36, 1Ч 10,5/13, 2ЧН 26/26, Д20 и показали явные преимущества покрытий. При теплоизоляции поршня температура и давление в КС к моменту начала впрыскивания топлива выше, чем без теплоизоляции. Температура керамической поверхности головки поршня выше на $50 - 100^\circ\text{C}$, а температура тела поршня ниже на $20^\circ - 85^\circ\text{C}$. Повышенная температура поверхности поршня определила мягкий рабочий процесс – условия для воспламенения стали более благоприятными, немного уменьшился период его задержки. При этом часть впрыснутого топлива за уменьшенный период задержки воспламенения небольшая, горение протекает в основном в диффузной фазе и заканчивается раньше на 30–40 гр. п.к.в. Наличие покрытия привело к улучшению экономичности дизеля на всех режимах и снижению суммарной токсичности отработанных газов. Было также установлено, что «иногда изменения рабочего процесса бывают чрезмерно велики по сравнению с незначительным повышением температуры поверхности» покрытия поршня [3]. Поэтому было выдвинуто предположение о каталитическом влиянии керамической поверхности на процесс сгорания [3].

При применении термоизолирующего эмалированного керамического

покрытия камеры сгорания поршня двигателя Д20 [6] повышенная температура стенок камеры сгорания повлияла на параметры рабочего процесса. Максимальная температура газа в КС увеличилась на 100 °С. Средняя температура газа за цикл повысилась на 60–80 °С по сравнению с серийным поршнем. Из-за повышения температуры смеси и давления в процессе сжатия сократился период задержки воспламенения на 2–3 гр. п.к.в., снизились скорость нарастания давления на 11–19 % и максимальное давление сгорания на 2,5–3,5 %. Изменение основных параметров рабочего процесса приведено на рисунках 5.19, 5.20.

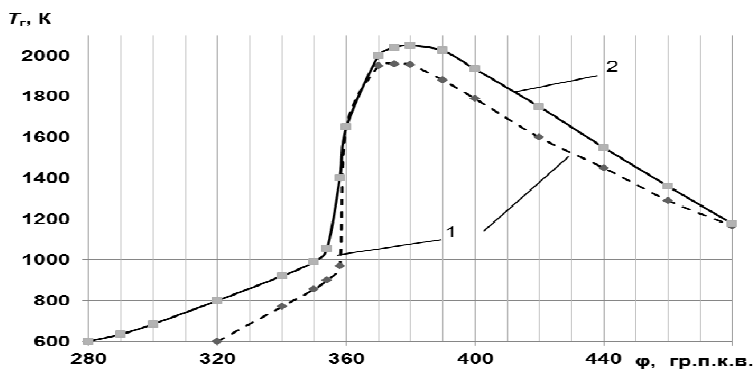


Рис. 5.19 – Температура цикла дизеля Д20, при $P_e = 0,59$ МПа и $n = 1600$ мин⁻¹:
1 – поршень серийный;
2 – поршень опытный

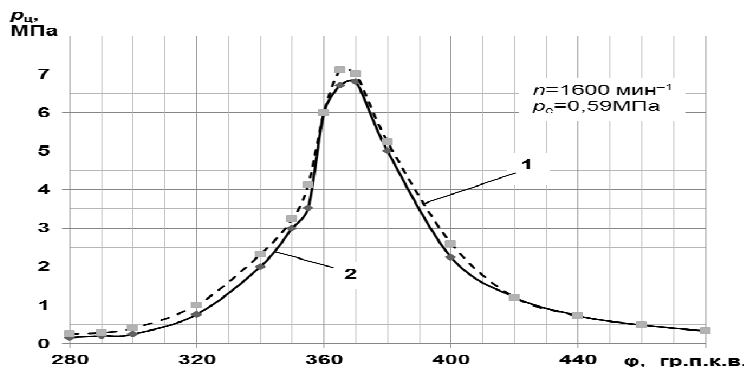
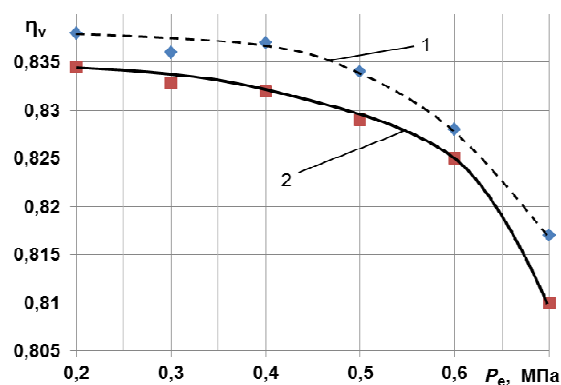


Рис. 5.20 – Индикаторные диаграммы дизеля Д20, при $P_e = 0,59$ МПа и $n = 1600$ мин⁻¹: 1 – поршень серийный; 2 – поршень опытный

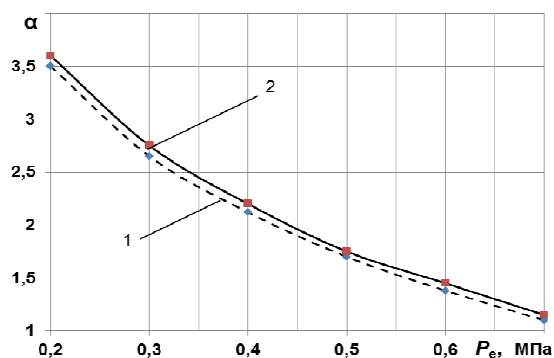
При использовании поршней с покрытием при изменении нагрузки снизился коэффициент наполнения (рис. 5.21, а), но при этом увеличился коэффициент избытка воздуха (рис. 5.21, б). Увеличился индикаторный и механический КПД (рис. 5.21, в, г). Индикаторный КПД увеличился на 2 – 2,5 %.

Снизилась максимальное давление цикла примерно на 0,25 МПа (рис. 5.21, д), скорость нарастания давления – почти на 0,1 МПа/гр.п.к.в. (рис. 5.21, е) и температура выхлопных газов – примерно на 25 °С (рис. 5.21, ж).

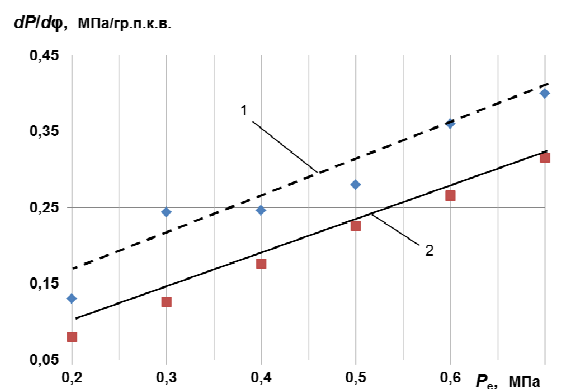
Аналогичное изменение параметров рабочего процесса происходит и в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя (рис. 5.22). Несколько снижается коэффициент наполнения, а коэффициент избытка воздуха увеличивается на 0,1, индикаторный КПД увеличивается на 0,5–1 %.



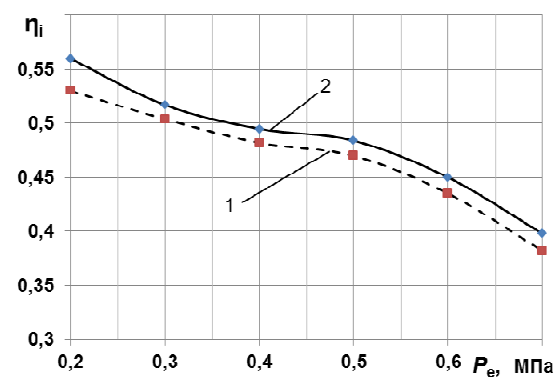
а



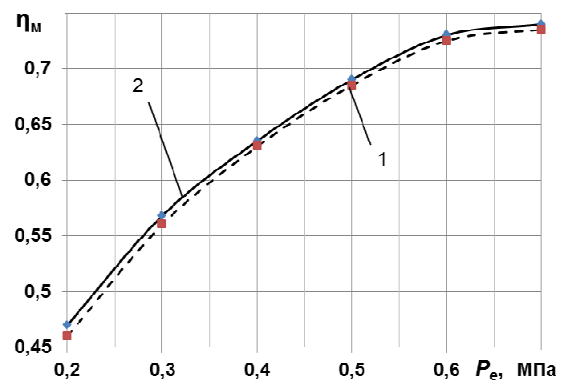
б



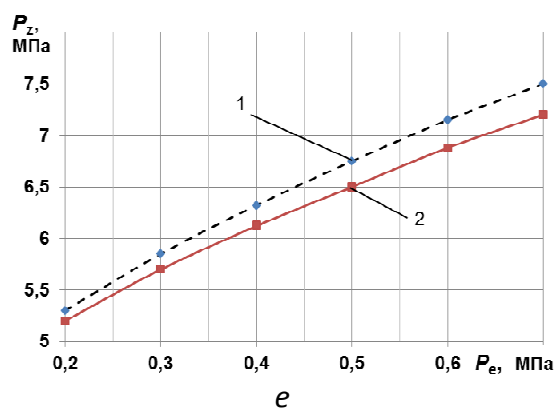
в



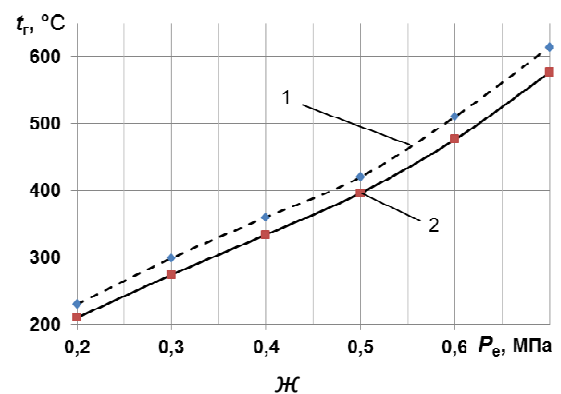
г



д



е



ж

Рис. 5.21 – Изменение основных параметров рабочего процесса в зависимости от нагрузки дизеля Д20 ($n = 1600 \text{ мин}^{-1}$):
1 – поршень серийный;
2 – опытный поршень.

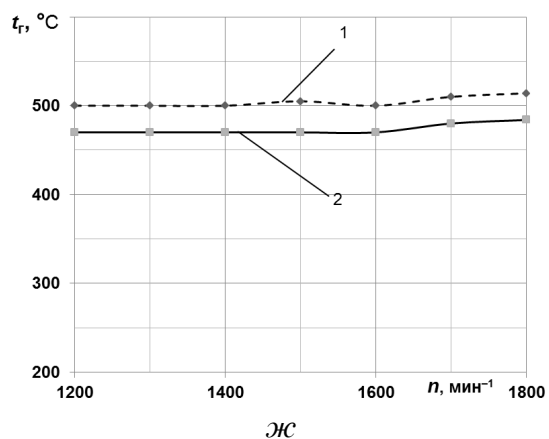
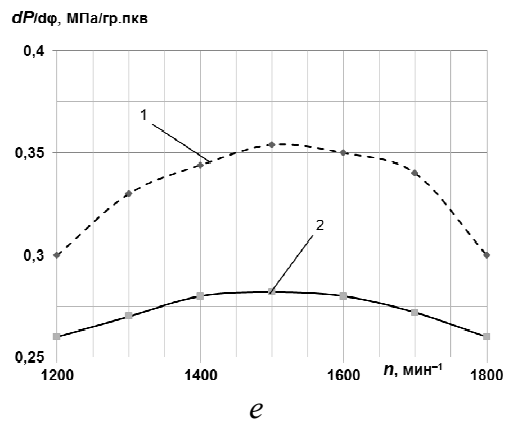
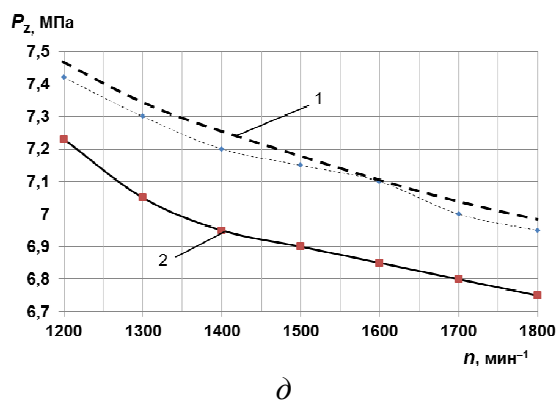
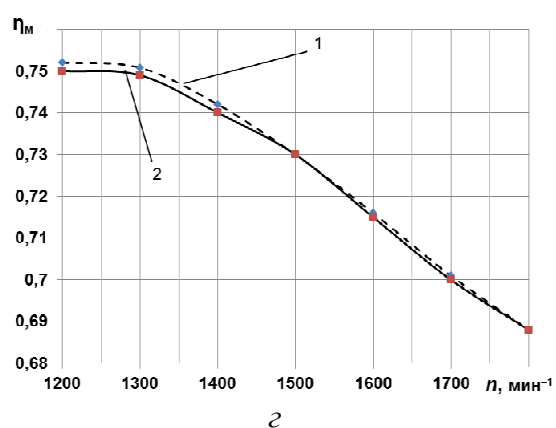
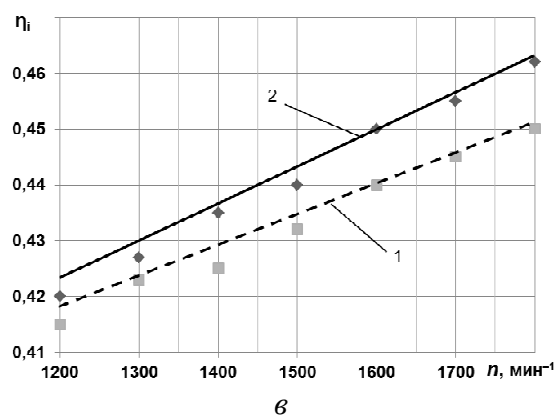
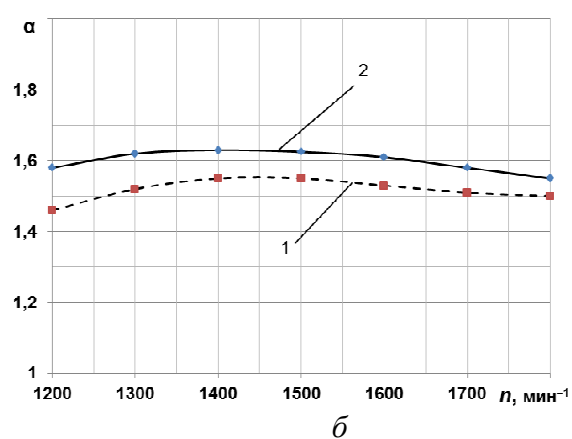
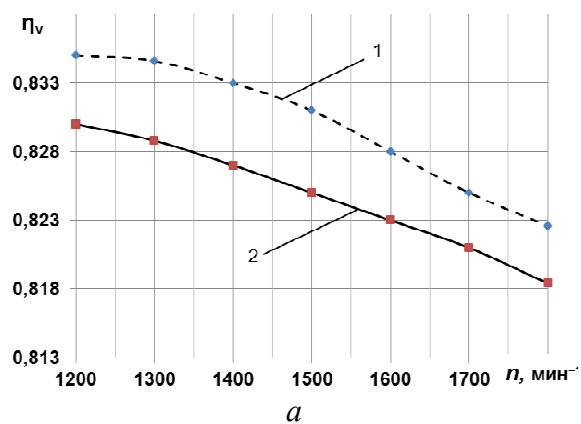


Рис. 5.22 – Изменение основных параметров рабочего процесса в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля Д20 ($P_e = 0,59$ МПа):
1 – поршень серийный;
2 – поршень опытный

Показатели рабочего процесса дизеля 1Ч24/36 с применением покрытия деталей КС и без покрытия приведены на рисунках 5.23, 5.24 и в таблице 5.3 [5].

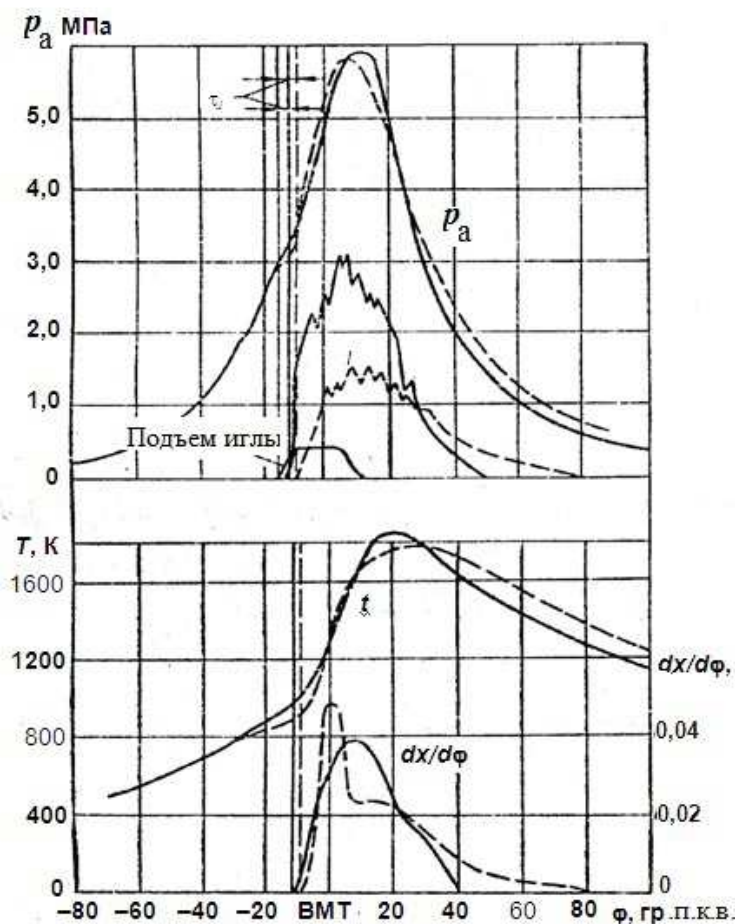


Рис. 5.23 – Индикаторные диаграммы p_r , характеристики тепловыделения $dx/d\phi$ и диаграммы свечения пламени l (дизель 1Ч24/36); $N_e = 100 \%$; $\phi_{оп} = 19$ гр. п.к.в. — поршень с покрытием; — — — поршень без покрытия

Повышение температуры на поверхности КС в поршне приводит к более полному сгоранию топлива, уменьшению расхода топлива и значительному уменьшению нагара, выгоранию сажи, доокисления оксида углерода, оксиды азота при этом могут возрасти, если не изменять угол начала подачи топлива.

В таблице 5.4 приведено влияние теплоизоляции стенок КС на содержание вредных компонентов в выпускных газах дизелей 1Ч13/14 и ЧН13/14 [3].

Индикаторный КПД значительно зависит от угла начала подачи топлива. При $\phi_{оп}=15$ гр. п. к.в. индикаторный КПД дизеля Ч 24/36 с серийными поршнями на 2 % выше, чем у дизеля с поршнями с покрытием (рис. 5.24, а), а при $\phi_{оп}=19$ гр. п.к.в. индикаторный КПД дизеля с поршнями с покрытием на всех нагрузках на 2,5 % выше, чем у серийного дизеля и достигает 51 % (рис. 5.24, б).

Более высокая температура поверхности покрытия КС приводит к уменьшению периода задержки самовоспламенения на 20–30 % как от изменения температуры и давления в конце сжатия, так и от влияния горячей поверхности покрытия. При этом снижается скорость нарастания давления на 25–30 %, становится более мягкой работа дизеля, уменьшается максимальное давление сгорания. Наблюдается также снижение уровня удельного эффективного расхода топлива.

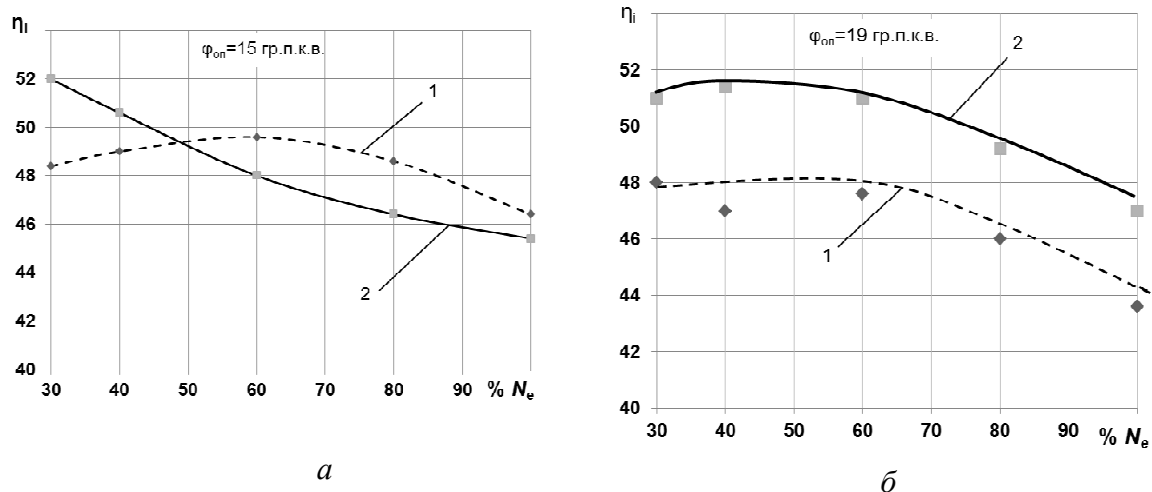


Рис. 5.24 – Изменение индикаторного КПД дизеля Ч 24/36 в зависимости от нагрузки при разных углах опережения подачи топлива [22]:
1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием

Таблица 5.3 – Показатели рабочего процесса дизелей

Обозначение дизеля	Материал поршня	Материал покрытия	Толщина покрытия, 10^{-3} м	n , мин ⁻¹	$\varphi_{оп}$, град	τ_i , град	$dp/d\varphi$, МПа / град	p_z , МПа	g_e , г/(кВт.ч)
1Ч 24/36	Чугун	—	—	360	15	5	0,15	5,8	248,5
		Al ₂ O ₃	0,2–0,25		19	3,5	0,16	5,9	244,4,0
		—	—		15	-	0,17	-	289,7
		Al ₂ O ₃	0,2–0,25		19	-	0,16	-	274,72
1Ч 18/22		—	—	750	18	6,75	0,46	6,2	234
		ZrO ₂	0,3–0,4		18	5,1	0,46	6,0	234
		ZrO ₂	0,3–0,4		15	2,45	3,4	5,2	224,4

Таблица 5.4 – Влияние теплоизоляции поршня на содержание вредных компонентов в отработанных газах

Теплоизоляция	Режим			Изменение состава, %		
	Наддув	p_e , МПа	n , мин $^{-1}$	Сажа	СО	N ₂ O ₅
Покрытие поршня	без наддува	0,69	1750	–24	–26	+5
	с наддувом	0,80	1750	–23	–12	+17

В работах Д.Н. Вырубова, А.Д. Чаромского, Г.Р. Рикардо,

И.С. Мейера указывается на положительное влияние горячих поверхностей деталей КС на показатели работы дизеля и на то, что существуют оптимальные значения температур деталей КС, которые обеспечивают получение наивыгоднейшего для цикла рабочего процесса. Установление оптимальных температур можно добиться изменением тепловых сопротивлений поверхностей деталей КС, изменяя толщину теплоизолирующего слоя. Этим обеспечивается не только уменьшение теплового потока от газа в детали КС, но и от деталей к свежему заряду. Необходимо иметь такое соотношение температуры поверхности и скорости движения газового заряда вдоль стенки, при котором происходило бы интенсивное смесеобразование в зоне возле стенки. Исследованиями ряда ученых А. Писчугера [23], О. В. Леонова, Э. П. Камзолова [24, 25], В. Ф. Ермакова [26] установлено, что для большинства современных камер сгорания при пленочном и объемно-пленочном смесеобразовании и работе на дизельных топливах температура поверхностей КС должна быть в пределах 320–380 °С. Установлено также влияние температуры стенки на удельный расход топлива для дизеля Ч10,5/13 с вихревой камерой (рис. 5.25). Отмечается, что если применяется покрытие, которое умеренно повышает температурный режим, то экономичность улучшается. Наибольшую эффективность в повышении экономичности дает покрытие на поршне из алюминиевого сплава, который состоит из оксида алюминия толщиной $(0,2–0,5) \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5.26).

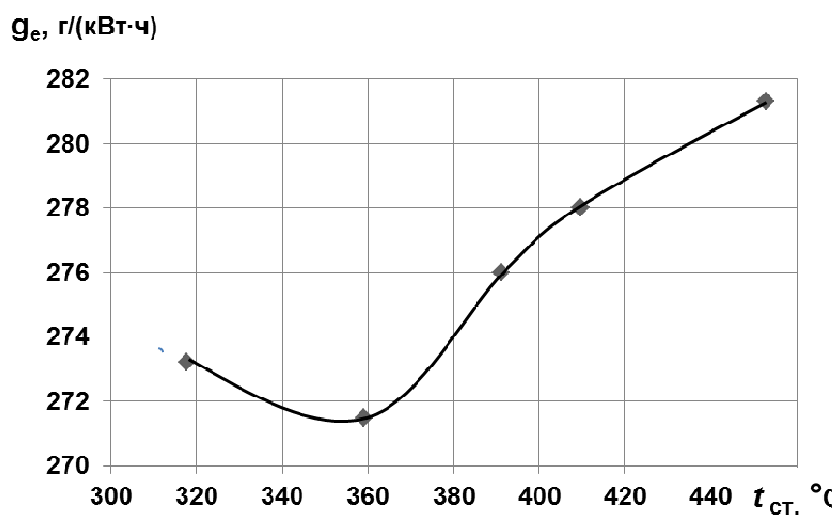


Рис. 5.25 – Зависимость удельного расхода топлива для дизеля Ч10,5/13 с вихревой камерой от температуры стенки

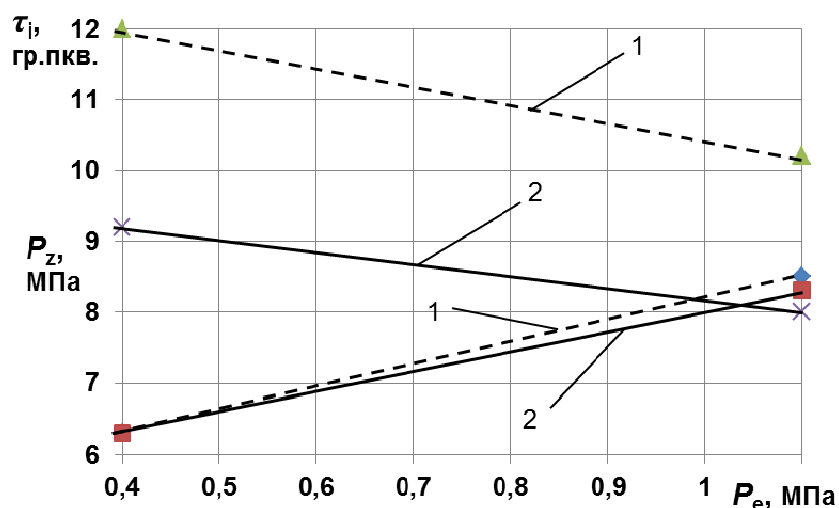


Рис. 5.26 – Зависимость периода задержки самовоспламенения τ_i и максимального давления P_z дизеля 1ЧН 25/34 от нагрузки: 1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием Al_2O_3 ; $\delta = (0,25-0,3) \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi_{оп} = 14-14,5^\circ$ [5]

В дизелях с керамическим покрытием деталей камеры сгорания улучшаются пусковые качества (рис. 5.27, 5.28) и уменьшается изнашивание деталей камеры сгорания.

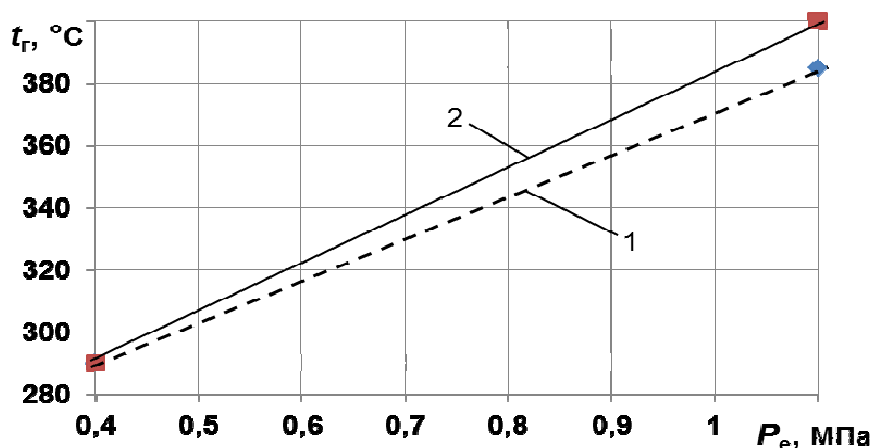


Рис. 5.27 – Зависимость t_r дизеля 1ЧН 25/34 от нагрузки: 1 – поршень без покрытия, 2 – поршень с покрытием Al_2O_3 ; $\delta = (0,25-0,3) \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi_{оп} = 14-14,5^\circ$ [5]

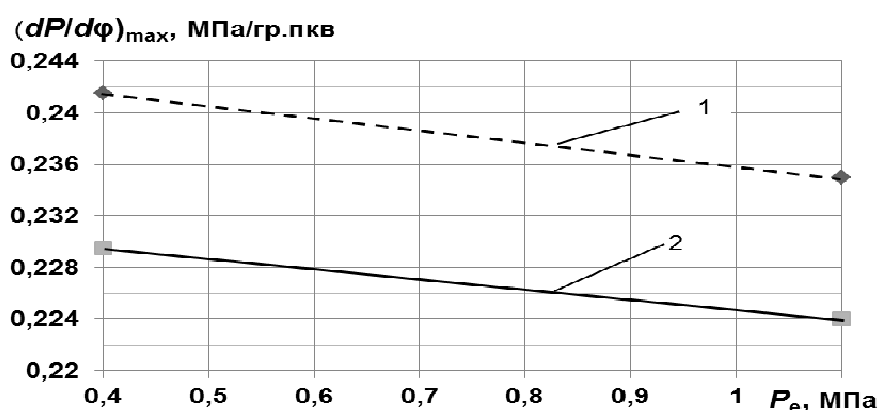


Рис. 5.28 – Зависимость скорости увеличения давления $(dP/d\varphi)_{max}$ дизеля 1ЧН 25/34 от нагрузки: 1 – поршень без покрытия; 2 – поршень с покрытием Al_2O_3 ; $\delta = (0,25-0,3) \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi_{оп} = 14-14,5^\circ$ [5]

Температура отработанных газов также зависит от теплоизоляции деталей ДВС. На рис. 5.29 видно, что температура газов, которые отработали, – наименьшая, когда детали КС не имеют покрытия или покрытие имеет толщину $0,7 \cdot 10^{-3}$ м.

Несмотря на преимущества теплоизолирующих покрытий, они не нашли практического применения в двигателях внутреннего сгорания из-за малой адгезионной прочности и термостойкости. Керамические покрытия на алюминиевых поршнях подвержены значительным растягивающим нагрузкам и имеют малую надежность.

Установлено, что тонкие покрытия начинают отслаиваться от кромок, а более толстые отслаиваются одновременно на большой поверхности. Таким образом, наметился путь решения проблемы теплоизоляции деталей камеры сгорания – применение тонких (толщиной до 10^{-3} м) не отслаивающихся оксидных керамических теплозащитных покрытий.

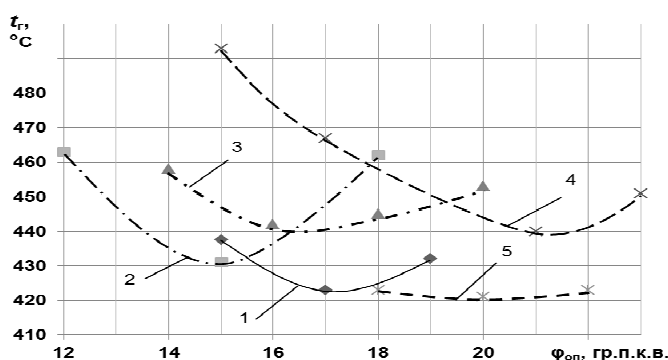


Рис. 5.29 – Зависимость t_r от $\phi_{оп}$ дизеля 1Ч 18/22: 1 – втулка покрыта наиритом, $h = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – поршень покрытый ZrO_2 , $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, втулка покрыта наиритом, $h = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – крышка покрыта ZrO_2 , $h = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, втулка покрыта наиритом, $h = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – поршень и крышка покрыты ZrO_2 , $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м и $0,6 \cdot 10^{-3}$ м соответственно, втулка покрыта наиритом, $h = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 5 – поршень, крышка и втулка не имеют покрытия

5.6. Анализ влияния износостойких и термостойких покрытий деталей цилиндра-поршневой группы на уменьшение механических потерь

Одним из путей улучшения топливной экономичности и увеличения мощности является снижение механических потерь в разных узлах трения двигателей внутреннего сгорания. Известно, что потери на трение в группе ЦПГ составляют порядка 50-70 % от общих механических потерь двигателя. В основном это потери от трения между цилиндром и поршневыми кольцами. Исследованиями [15] установлено, что при использовании гильз из алюминиевого сплава Д16 с керамической рабочей поверхностью мощность механических потерь меньше на 7–10 % по сравнению с серийными гильзами (рис. 5.30).

После испытаний был проведен анализ керамической поверхности гильз, который позволил сделать вывод, что снижение трения происходит из-за проникновения частиц сажи в поры керамической поверхности гильз при сгорании топлива и масла в КС.

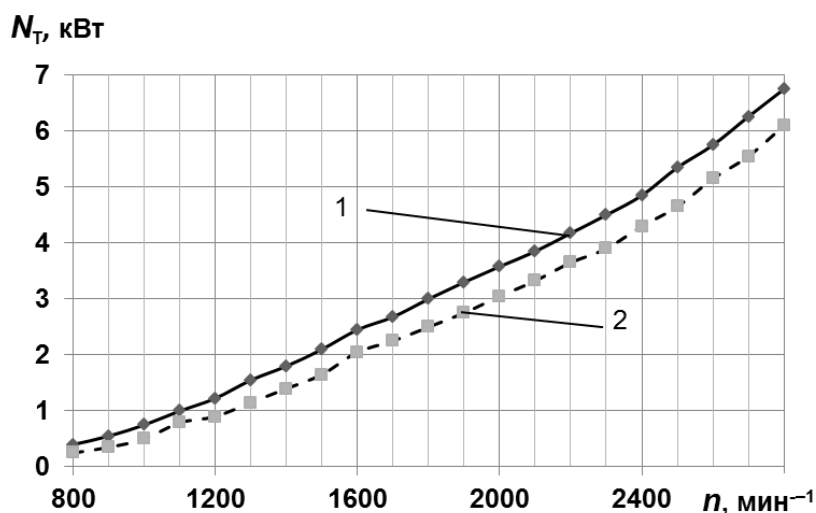


Рис. 5.30 – Сравнительные характеристики механических потерь:
1 – ДВС с серийными гильзами; 2 – ДВС с керамической поверхностью на гильзах

На кафедре ДВЗ НТУ «ХПИ» проведена оценка [27] влияния теплоизоляции поршня на уменьшение механических потерь. Установлено, что уменьшение среднего давления механических потерь в избранных границах позволяет повысить эффективный КПД двигателя η_e до 0,423. Это повышает его экономичность на 4 %. Вместе с тем уменьшение величин P_m и P_i позволяет снизить максимальное давление до $P_z = 17,3$ МПа. Таким образом установлено, что уменьшение механических потерь двигателя является дополнительным резервом улучшения его показателей.

5.7. Механизм влияния гальвано-плазменного покрытия поршней на показатели рабочего процесса автотракторных дизелей

Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в [3, 4, 5, 28–37], по применению керамической теплоизоляции на поршнях тепловозного, тракторных и комбайновых дизелей, автомобильных, картинговых, спортивных и авиационных бензиновых двигателей позволяют утверждать, что гальвано-плазменная обработка поршней с оптимальными параметрами теплоизолирующего керамического слоя влияет на физико-химические процессы, которые протекают в КС, позволяет улучшить экономические и экологические показатели двигателей внутреннего сгорания и обеспечивает высокий уровень надежности и ресурса ЦПГ.

Для учета новых факторов улучшения экологических показателей автотракторных дизелей необходимы новые теоретические представления для описания совокупности известных и установленных эффектов и соответствующие математические модели, которые их учитывают. Первая из новых моделей должна учитывать влияние гальвано-плазменной теплоизоляции на

показатели рабочего процесса, вторая – новые условия трения в паре поршень-гильза цилиндра, которые влияют на механические потери двигателя. Комплексная совокупность этих моделей определяет новые уровни индикаторных и эффективных показателей дизеля заданной мощности и является весомым инструментом влияния на экологичность дизеля.

Для определения нестационарной теплопроводности поверхности КС и влияния нестационарной температуры поверхности КС на сжатие рабочего тела, предпламенную подготовку топлива и эффективность его сгорания взята математическая модель рабочего процесса, предложенная проф. А.К. Костиным и Н.Ф. Разлейцевым [3]. Предложено уравнение, которое довольно полно отображает свойства теплообмена для моделирования высокочастотной нестационарной теплопроводности поршня. С учетом низкотеплопроводного слоя на поверхности основного материала поршня и зависимости физических свойств материалов от температуры запишем его в развернутом виде:

$$\rho(x)c(x,T(x,\tau))\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \partial \left(\lambda(x,T(x,\tau)) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right) / \partial x. \quad (5.1)$$

Будем считать, что стенка поршня имеет толщину l . Тепловое взаимодействие с ней рабочего тела характеризуется сложнопериодическим высокочастотным изменением температуры газа $T_r(\tau)$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha_r(\tau)$. Отвод от противоположной стенки происходит в масло и характеризуется параметрами T_m, α_m . ГУ [38] со стороны рабочего тела КС имеют вид:

$$\rho(0)c(0,T(0,\tau))\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial \tau} = \partial \left(\lambda(0,T(0,\tau)) \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} + \alpha_r(\tau)(T_r(\tau) - T(0,\tau)) \right) / \partial x. \quad (5.2)$$

Со стороны масляного охлаждения:

$$\rho(l)c(l,T(l,\tau))\frac{\partial T(l,\tau)}{\partial \tau} = \partial \left(\alpha_m(T_m - T(l,\tau)) - \lambda(l,T(l,\tau)) \frac{\partial T(l,\tau)}{\partial x} \right) / \partial x. \quad (5.3)$$

Модель нестационарной теплопроводности дополняется начальными условиями: $T(x,0) = T_0(x) \Big|_{x \in [0;l]}$.

Оснащение теплопринимающей высокотеплопроводной поверхности КС низкотеплопроводным слоем довольно малой толщины позволяет, при значительном росте максимальной мгновенной температуры этой поверхности, получить эффект снижения минимальной мгновенной температуры.

Максимальный эффект достигнут при толщине слоя $(0,12-0,16) \cdot 10^{-3}$ м, когда минимальная температура снизилась на 13° , с 319°C до 306°C . При этом

среднецикловая температура поверхности повышается на 20° , с 319°C до 339°C . Здесь минимальная температура достигается на участке от 0 до 300° поворота коленчатого вала, а максимальная – вблизи 385° соответственно в зонах минимальных и максимальных значений коэффициента теплоотдачи (рис.5.31).

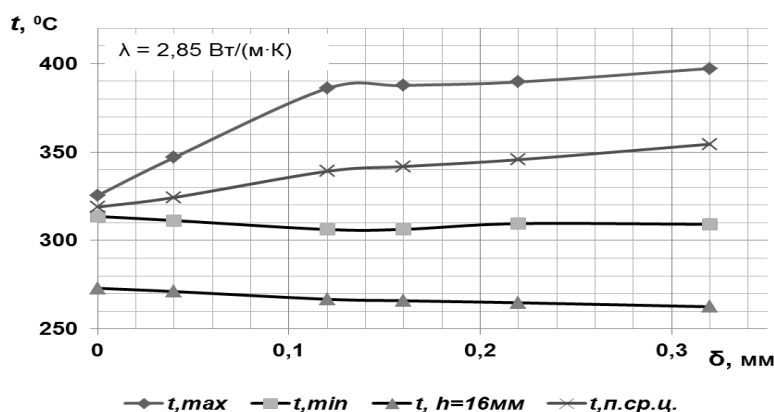


Рис. 5.31 – Температура поверхности поршня в зависимости от толщины δ теплозащитного слоя: t_{\min} – минимальная мгновенная температура цикла; t_{\max} – максимальная мгновенная температура цикла; $t_{h=16\text{мм}}$ – температура внутри доньшка поршня; $t_{\text{п.ср.ц.}}$ – температура поверхности среднецикловая

При толщинах корундового слоя $(0,12\text{--}0,16) \cdot 10^{-3}$ м уменьшается скорость роста максимальной мгновенной температуры t° цикла и прекращается снижение минимальной, и поэтому, на наш взгляд, эти значения толщины слоя теплоизоляции можно считать лучшими для теплоизоляции поршня.

Полученный результат имеет большое практическое значение при выборе рациональной толщины корундового слоя поршней ДВС.

В реальном процессе сгорания топлива в цилиндре дизеля происходит сложный процесс теплообмена, при котором температурное поле поверхностей деталей КС изменяется в течение всего цикла. Происходит следующее: рост величины полного колебания температуры поверхности поршня при росте максимальной и уменьшении минимальной температуры (рис. 5.32); уменьшение глубины проникновения температурной волны в тело поршня; увеличение скорости изменения температуры поверхности детали; уменьшение фазового сдвига температурной волны по отношению к мгновенной температуре рабочего тела в цилиндре двигателя [28, 29, 35].

Положительное влияние на показатели рабочего процесса проявляется в следующем. При наполнении цилиндра свежим зарядом тепловой поток от стенки КС направлен к рабочему телу. Небольшая толщина низкотеплопроводного поверхностного слоя вызывает уменьшение его температуры до уровня температуры рабочего тела. Температура слоя становится ниже температуры основного материала поршня, коэффициент наполнения цилиндра возрастает.

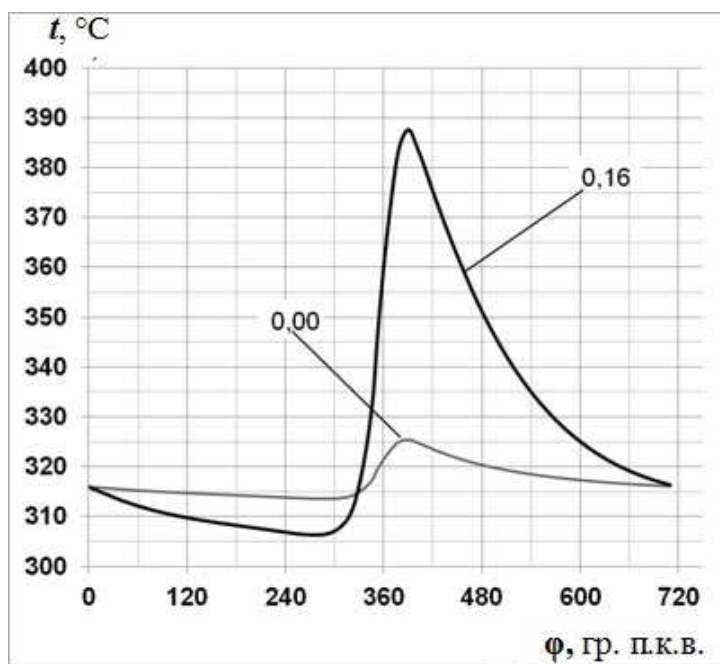


Рис. 5.32 – Изменение температуры t на огневой поверхности поршня в течении цикла. Цифры указывают толщину корундового слоя $\delta \cdot 10^{-3}$ м

На такте сжатия тепловой поток направлен от рабочего тела в стенку КС, температура слоя возрастает и становится выше температуры основного материала поршня [39]. Тепловой поток от рабочего тела к поверхности КС уменьшается. Возрастает температура рабочего тела, и уменьшается период задержки самовоспламенения топлива. Доля топлива, которая попала на стенку КС в поршне вследствие повышенной температуры поверхности стенки, выпаривается более эффективно. Высокая температура поверхности КС во время сгорания топлива и расширения рабочего тела способствует уменьшению теплового потока в стенку поршня и соответственно уменьшению коэффициента относительных потерь теплоты в стенку. Расчеты осуществлены для дизеля 4ЧН12/14 в двух вариантах – для серийного поршня и для поршня с гальвано-плазменной обработкой поверхности в зоне КС [39].

Анализ представленных результатов дает основание для следующих выводов:

1. Одним из перспективных способов повышения технических характеристик ДВС является частичная динамическая изоляция стенок его термически нагружаемых элементов.
2. Одним из эффективных способов улучшения показателей рабочего процесса ДВС является применение гальвано-плазменных покрытий.
3. Предлагаемые покрытия обеспечивают не только теплоизоляцию, но и другие позитивные изменения в контактном взаимодействии деталей.

Исследование трибомеханических свойств предложенных покрытий – в подразд. 5.1.

5.8. Применение технологии микродугового оксидирования для получения износостойкого и теплостойкого керамического слоя на деталях цилиндрично-поршневой группы

На поршнях из алюминиевых сплавов находит применение технология оксидо-керамических покрытий [15]. В этом случае формирование покрытия происходит за счет микродугового оксидирования алюминиевой поверхности самой детали, а покрытие имеет более высокую адгезию с алюминиевой основой. Это уже не покрытие, а керамический слой. Его получают в гальваностатическом и потенциостатическом режимах. В работе [40] сообщается, что при образовании керамического слоя на огневой поверхности алюминиевого поршня методом микродугового оксидирования, при взаимодействии с серной кислотой создается защитный слой (шуба) с коэффициентом теплопроводности 25 Вт/(м К) . Это значительно меньше, чем у алюминиевого сплава, который имеет коэффициент теплопроводности около 230 Вт/(м·К) и позволяет работать поршню при более высоких температурах. Некоторые исследователи считают [15], что применение однофазных оксидных плёнок для теплоизоляции деталей КС нецелесообразно из-за большой разницы коэффициентов термического расширения покрытия и материала поршня. Проблему могут решить многокомпонентные и многофазные керамические слои, которые имеют коэффициенты линейного расширения, близкие аналогичному коэффициенту детали КС, полученные методом анодного микродугового оксидирования (АМДО).

Сообщается, что такой керамический слой получают с помощью установки [15], которая представляет собой трехфазный источник питания, который формирует импульсы выпрямленного напряжения частотой 150 Гц с амплитудой 450 В в многокомпонентном щелочном электролите состава $\text{KOH} + \text{NaSi} + \text{SiO}_n\text{HO}$ с добавками фосфорудерживающих ингредиентов в гальваностатическом и потенциостатическом режимах методом АМДО.

Обработка в гальваностатическом режиме ведется при напряжении до 250 В и плотности тока около $2 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$. Керамический слой в основном состоит из твердофазных растворов окислов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, которые представляют (60–70) %, и других окисных соединений элементов, которые входят в состав сплава и электролита. Известно, что структура $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ имеет более высокую твердость, чем структура $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и более высокую износостойкость.

При этом выход на режим устойчивого процесса АМДО составляет 25–30 мин, а потом идет формирование оксидной керамики толщиной $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В этом случае «сформировать слой необходимой толщины за экономически целесообразный промежуток времени едва ли удастся» [15].

Для сокращения времени обработки авторами предлагается увеличить плотность тока до $2,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$, но при этом растет напряжение и микродуги срываются в дуги и прожигают поверхностный слой. Вместе с тем предыдущими исследованиями проблема повышения плотности тока не была решена.

Керамические покрытия, образованные методом АМДО, позволили получить снижение эффективного расхода топлива. Однако использование режимов обработки с низкими параметрами позволяет создавать покрытия на небольших поверхностях, а создание покрытий на промышленных изделиях экономически нецелесообразно. Кроме этого, наличие неметаллических включений и легкоплавких соединений в поршневых алюминиевых сплавах приводит к образованию окислов с малой адгезией, которые отрицательно влияют на ресурс и надежность двигателей.

На литейных сплавах керамический слой получают на потенциостатическом режиме и рабочих напряжениях 270–300 В. Для сокращения времени обработки можно увеличить плотность тока до $2,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$. Однако при напряжении больше 300 В происходит срыв разряда в дугу и появляются прожоги.

Появились публикации противоречивого характера об использовании метода МДО для образования покрытий на деталях ДВС и влиянии этих покрытий на ресурс и эффективность работы двигателей. Расхождение результатов экспериментальных и расчетных данных, расхождение выводов в основном связано с тем, что предыдущие исследования не носили комплексного характера. Не была решена задача технологического обеспечения получения корундового слоя с преобладающим количеством фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, повышение плотности тока более $3 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$, получение корундового слоя с высокой адгезией на площади более 1 дм^2 .

5.9. Технологический процесс гальвано-плазменной обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов

Образование на поршнях поверхностного корундового слоя толщиной до $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ в НТУ «ХПИ» осуществлялось на исследовательской установке «Корунд-7» методом гальвано-плазменной обработки [26] в щелочном электролите при рабочем напряжении 1000–1200 В при плотности тока до $1 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Технология гальвано-плазменной обработки отличается от известных прежде методов МДО электрофизическими параметрами процесса, конфигурацией импульсов напряжения, имеет более высокую скорость формирования корундового керамического слоя за счет высокой плотности тока, позволяет обрабатывать относительно большие поверхности, удаляет из поверхностного слоя детали

неметаллические примеси, легкоплавкие соединения, которые имеют малую адгезию к основному металлу и более низкую теплостойкость. Эти примеси и соединения окисляются, некоторые из них выпадают в осадок, образуют шлам и скапливаются на дне ванны, а окислы, которые остались на поверхности, имеют малую адгезию к основному металлу и легко снимаются механическим путем с поверхности корундового слоя. При этом корундовый слой приобретает более высокую микротвердость (17–20 ГПа) и теплостойкость до 1200 °С.

На установке «Корунд-7» можно получать корундовый слой толщиной до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м или покрытие толщиной $(0,5–0,6) \cdot 10^{-3}$ м. Максимальная толщина корундового слоя, пористость и микроструктура зависят от характеристик токовых импульсов, а толщина покрытий зависит как от токовых импульсов и температуры корундирования, так и от состава электролита. Этим объясняется применение напряжений до 1200 В для получения большой толщины. Скорость процесса можно изменять в широком интервале путем изменения плотности тока. На установке можно получить плотности тока от 10^2 до $2 \cdot 10^4$ А/м².

В процессе гальвано-плазменной обработки деталей из алюминиевых сплавов происходит электрохимическое окисление поверхности в щелочном электролите. Здесь протекают реакции разряда гидроксильных групп, разряда анионов, химическое растворение анода, образование оксидов и гидроксидов металла анода. При импульсном напряжении между анодом и катодом 600–1000 В и плотности тока до $1,2 \cdot 10^4$ А/м² с увеличенным анодным полупериодом напряжения за счет катодного, на поверхности корундируемой детали горят микродуговые разряды, которые перемещаются, образуя оксиды сплава алюминия с ячеистой структурой. В процессе окисления, по разогретым разрядным каналам оксида двигаются к поверхности ионы металла, а навстречу им из электролита двигаются ионы кислорода. В результате происходит увеличение толщины оксидного слоя.

Разработанный метод гальвано-плазменной обработки показал свою экономическую эффективность. Измерение толщины и твердости образованного корундового слоя осуществляется с помощью вихретокового толщиномера ТСП ВТ-10 НЦ и микротвердомера ПМТ-3.

Маршрутный технологический процесс ГПО поршней ДВС учитывает операции по подготовке поршней к ГПО: осмотр и устранение дефектов, микрометраж, электроизоляцию необрабатываемых поверхностей. После ГПО предполагается: полировка, микрометраж, определение параметров

корундового слоя и пропитка маслом цилиндрической поверхности поршней. Эта маршрутная технология применялась при ГПО поршней двигателя МеМз, тепловозных дизелей ЧМЕ-3, тракторных дизелей Д240Л, Д65НТ1, 4ЧН12/14 и др., что позволило повысить ресурс и улучшить эффективные показатели двигателей с поршнями с корундовым слоем.

5.10. Оборудование для гальвано-плазменной обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов

Установка позволяет вести гальвано-плазменную обработку при анодно-катодном напряжении 1000 – 1200 В с плотностью тока около $(1-1,3) \cdot 10^4$ А/м², обеспечить высокую скорость образования корундового слоя, а специальные формы анодного и катодного полупериодов напряжения позволяют очистить корундовую поверхность от окислов с малой адгезией к основному металлу.

Основные технические данные этой установки:

Питание установки, В	380
Частота, Гц	50
Число степеней регулирования мощности	4
Рабочий ток, А	200
Рабочее напряжение, В	1200
Температура электролита, °С	20 – 60
Габаритные размеры:	
источника питания, м	1,5×0,4×1
гальваническая ванна, м	0,5×0,5×1
система охлаждения, м	0,5×0,5×1
Масса установки, кг	200

Схема установки «Корунд-7» в виде отдельных блоков приведена на рис. 5.33. Она состоит:

- из силового блока с четырьмя степенями регулирования мощности – 1;
- блока управления – 2;
- измерительного блока – 3;
- гальванической ванны – 4;
- системы подачи и охлаждения электролита – 5;
- системы крепления детали – 6;
- системы воздушного охлаждения электролита – 7;
- системы подачи и охлаждения воды – 8.

Рассмотрим основные блоки (рис. 5.34). Блоки 1, 2, 3 составляют источник питания. Для процесса ГПО используются постоянный, переменный и

```

graph TD
    4 --- 1
    4 --- 2
    4 --- 3
    4 --- 6
    4 --- 7
    4 --- 8
    4 --- 9
    5 --- 7
    5 --- 8
    5 --- 4

```

134

си железа замедляют процесс формирования корундового слоя.

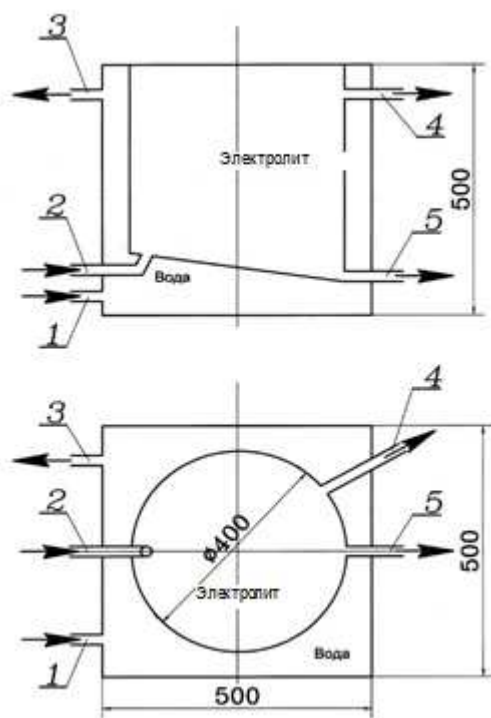


Рис. 5.35 – Эскиз электролитической ванны

С увеличением содержания железа необходимо увеличивать концентрацию химических реактивов в электролите, которая приводит к образованию «муллита» на поверхности корундового слоя.

Ванна состоит из корпуса с двойными стенками. Внешняя ванна имеет размеры 0,5х0,5х0,5 м.

Толщина листа внешней стенки ванны $1 \cdot 10^{-3}$ м, внутренней стенки – $0,6 \cdot 10^{-3}$ м.

Внутренняя ванная круглая, диаметром 0,4 м, высотой 0,4 м. Имеет 3 штуцера – для подачи электролита в зону обработки, для отбора электролита в систему охлаждения и для слива электролита из ванны.

Пустота между стенками ванны герметична. Расстояние между стенками не менее 0,02 м, должно обеспечивать быстрое охлаждение внутренней стенки ванны. Внешняя ванна имеет 2 штуцера. Один для подведения охлаждающей воды, второй – для отбора нагретой воды. Доньшко внутренней ванны – наклонное, чтобы в нижней части ванны собирался шлам – окислы, которые выпали в осадок. В нижней части доньшка расположен сливной штуцер со сливным шлангом и краном. Это позволяет сливать весь электролит.

Внутри ванны располагаются сетчатые катоды, которые закрепляют на изоляторах на расстоянии от внутренних стенок ванны не менее чем на 0,03–0,04 м (рис. 5.36, см. цвет. вклейку).

При ГПО наружной поверхности поршня электролит подаётся через трубку 1 в камеру сгорания на доньшке поршня, затем заполняет пространство между катодом и цилиндрической поверхностью поршня. В процессе ГПО он нагревается и сливается в ванну через отверстия в верхней части катода (рис. 5.37, 5.38).

5.11. Исследование корундовой поверхности

При плотностях тока до 30 А/дм^2 температура в канале пробоя составляет около 1000 К и при этом происходит в большей мере образование структуры $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 5.39, а).

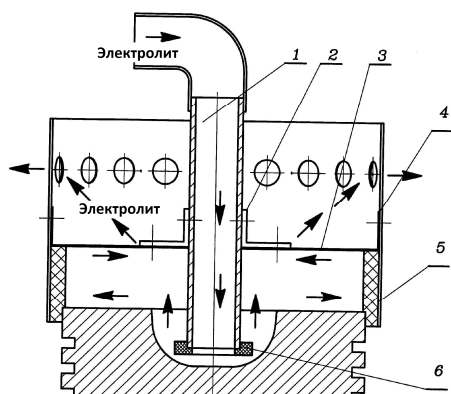


Рис. 5.37 – Схема подачи электролита при обработке КС

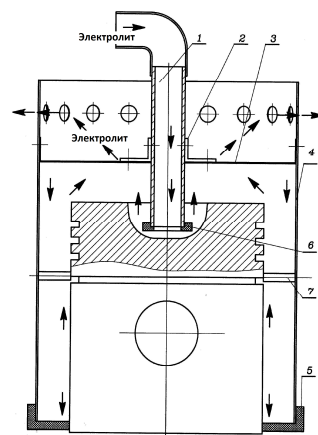


Рис. 5.38 – Схема подачи электролита в зону обработки всей поверхности поршня

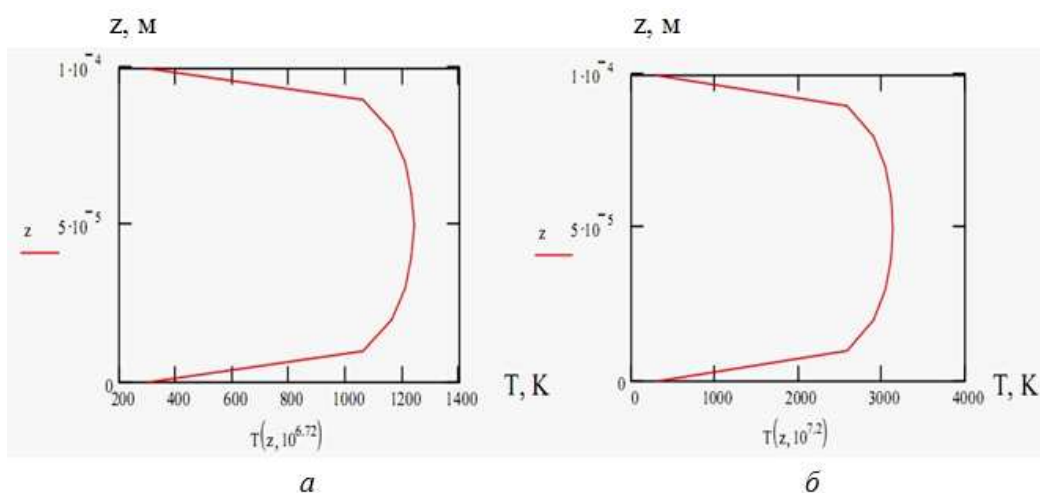


Рис. 5.39 – Распределение температуры в канале пробоя по оси Z при разных значениях плотности тока

При больших плотностях тока температура в канале пробоя может достигать 2500–3000 К и при этом преимущественно образуется структура α - Al_2O_3 (рис. 5.39, б, рис. 5.40) с повышенной твёрдостью (рис. 5.41), износостойкостью и теплостойкостью.

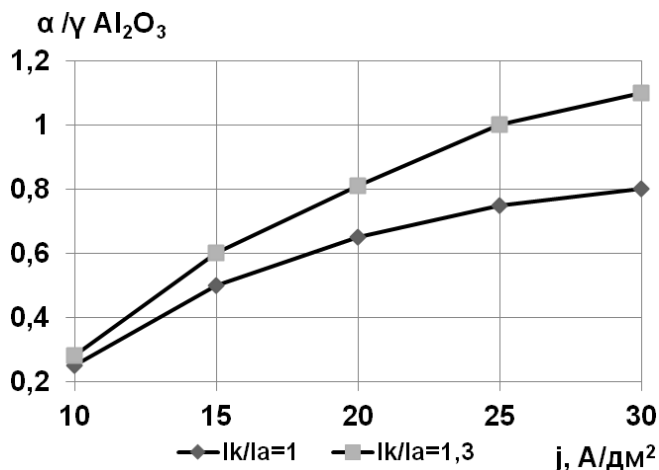


Рис. 5.40 – Зависимость $\alpha/\gamma \text{Al}_2\text{O}_3$ от плотности тока

Распределение твёрдости корундового слоя по глубине неравномерно.

На наружной поверхности твёрдость меньше, а по мере приближения к основному металлу твёрдость возрастает.

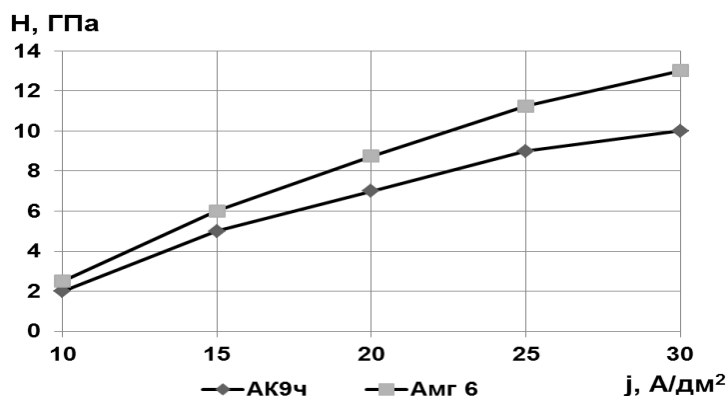


Рис. 5.41 – Изменение твёрдости поверхности в зависимости от плотности тока

И только на расстоянии 5–10 мкм от основного металла она резко снижается до твёрдости основного металла (рис. 5.42).

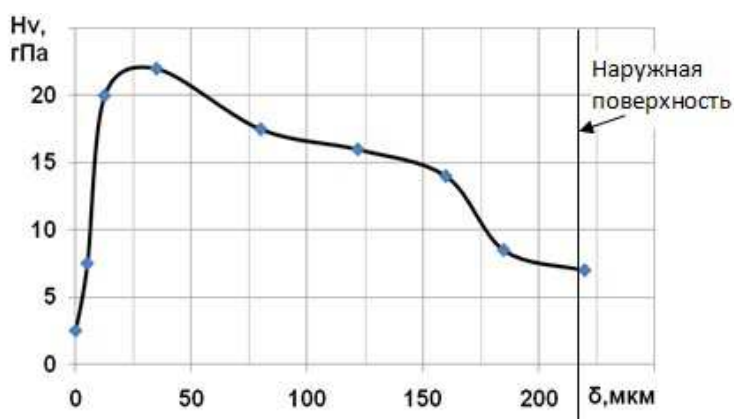


Рис. 5.42 – Изменение твёрдости корундового слоя по глубине

На рис. 5.43 приведен характер изменения пористости слоя по глубине. Пористость на наружной поверхности достигает 25–30 %, а с глубиной снижается и в рабочем слое составляет 8–12 %.

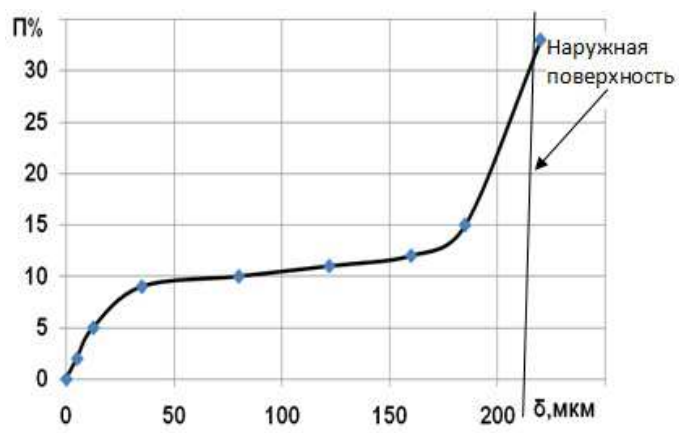


Рис. 5.43 – Изменение пористости корундового слоя по глубине

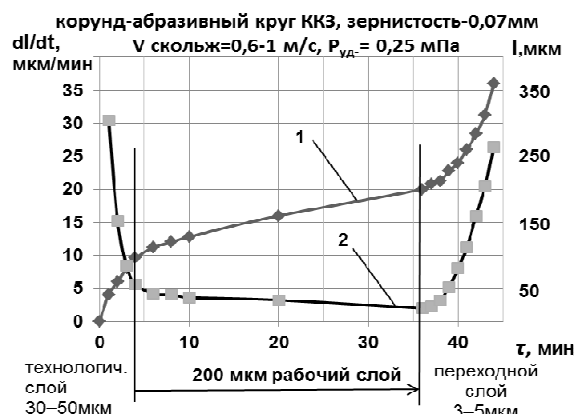


Рис.5.44 – Характеристики износа:
1 – величина износа керамического слоя;
2 – скорость износа керамического слоя

Технологический слой быстро изнашивается, и потому от него нужно избавиться. Он легко сполиривается и снимается мелкой наждачной шкуркой. Толщина этого слоя 30 – 50 мкм (рис. 5.44). Рабочий слой изнашивается гораздо медленнее. Даже при трении абразивным кругом скорость износа составляет 10-20 мкм/мин.

На рис. 5.45 (см. цвет. вклейку) показана боковая поверхность цилиндрической части серийного поршня

после кратковременных испытаний. Отчётливо видны следы износа покрытия дисульфида молибдена и микронеровностей. После гальвано-плазменной обработки этого же поршня и полировки поверхность поршня становится пористой и имеет зеркальную поверхность. Размеры диаметра поршня при этом не изменяются. Корундовый слой состоит из гексагональных ячеек с центрально ориентированными порами, в основном имеет кристаллическое строение с хаотичным ориентированием кристаллов (рис. 5.46–5.49, см. цвет. вклейку).

Таким образом, как свидетельствуют результаты исследований, корундовый слой, образуемый на поверхности деталей из алюминиевых сплавов по предложенной технологии, образует плотное, прочное, твердое, износостойкое покрытие с высокой адгезией с основным материалом и хорошими свойствами. В связи с этим его можно рекомендовать для внедрения с целью повышения технических характеристик двигателей и других изделий.

Литература к разделу 5

1. Walase, F.J., Kao, T.K., Alekxander, W.A., Cole, A.C. and Tarabad, M. Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles. SAE, Detroit. Mar. 1983. Paper 830312.
2. Щеголь А.Я. Влияние жаровой накладки на поршне на температурное состояние деталей двигателя / А.Я. Щеголь// Двигатели внутреннего сгорания. – Вып. 2. – Х., 1965. – С. 41.
3. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов В.И. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.

4. Коллегов Е.В. Поршни дизеля ОД100 с керамическими покрытиями / Е.В.Коллегов // Вестн. Всесоюзн. научно-исследов. института железнодорожн. Транспорта. – 1965. – № 1. – С. 44–51.
5. Никитин М.Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей / Никитин М.Д., Кулик А.Я., Захаров Н.И. – Л.: Машиностроение, 1977. – 165с.
6. Чепиль В.С. Исследование влияния термоизолирующего покрытия доньшка камеры сгорания в поршне на параметры рабочего процесса и тепловое состояние двигателя Д20 / В.С.Чепиль, Я.И. Гордиенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 1970: Вып. 10. – С. 46–52.
7. Bryzik W., R.Kamo / Cummins Adiabatic Engine Program. SAE Paper No.830314.
8. Kawamyra H. The Development Statys of Isuzu Ceramik Adiabatic Engine. Lecture Wiener Motoren-Suposium, 1985.
9. Woschni Gerhard. Experimental investigation of the heat transfer in internal combastion engines with insulated combastion chamber walls. Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines. England, 1987, 13 pp.
10. Woschni Gerhard, Spindler Walter, Kolesa Konrad. Heat insulation of combastion chamber walls-a measure to decriase the fuel consumption of I.C. engines? “SAE Techn. Pap. Ser.”, 1987, No.870339, 11 pp.
11. Valland,H. A teoretikal analysis of thermal barriers in diesel engine cylinders / Valland,H. and Wyspianski, G.K.//.Norwegian Marine Reasearh. – 1982. – 10, N0. 2,34.
12. Walase, F.J., Kao, T.K., Alekxander, W.A., Cole, A.C. and Tarabad, M. Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles. SAE, Detroit. Mar. 1983. Paper 830312.
13. Абрамчук Ф.И. Улучшение технико-экономических и экологических показателей высокооборотных дизелей малой мощности путём изменения условий смесеобразования / Ф.И. Абрамчук, Д.И. Тимченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 1. – С. 86–88.
14. Михайлов А.С. Исследование влияния тепловой изоляции днища поршня на его температурное состояние и рабочий процесс при высоком наддуве / А.С.Михайлов // – Тр. ЦНИДИ. – 1961 – Вып. 57. – С. 107–111.
15. Чигиринова Н.М. Оксидные керамические покрытия – эффективная тепловая защита рабочих поверхностей деталей ЦПГ / Чигиринова Н.М., Чигиринов В.В., Чигиринов В.Е. // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 6. – С. 30–34.

16. Костин А.К. Экспериментальное исследование локального теплообмена в цилиндре высокооборотного двигателя / А.К. Костин, Л.И. Михайлов, Ж.О. Сазаев // Двигателестроение. – 1982. – № 4. – С. 12–15.
17. Костин А.К. К вопросу о локальных параметрах теплообмена в камерах сгорания дизеля / А.К.Костин, Л.И. Михайлов, З.К. Славинский // Двигатели внутреннего сгорания. – Ярославль. – 1981. – С. 17–21.
18. Костин А.К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: справочник / А. К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю. Ю. Кочинев – Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
19. Костин А.К. Формирование тепловых потоков по тепловоспринимающей поверхности камеры сгорания / А.К. Костин, Ж.О. Сазаев // Двигателестроение. – 1983. – № 4. – С. 21–34.
20. Белогуб А.В. Расчетно-экспериментальное формирование образующей поршня тепловозного двигателя / А.В. Белогуб, А.А. Зотов, А.Г. Щербина // Авиационно-космическая техника и технология. – 2001. – Вып. 26. – С. 100 – 102.
21. Фомин В.М. Пути совершенствования эколого-экономических показателей дизелей / В.М.Фомин // Автомобильные и тракторные двигатели: межвуз. сб. науч. тр. – вып. XVI. – 1999. – С. 23.
22. Белогуб А.В. Новые подходы к конструированию поршней / А.В. Белогуб // Авиационно-космическая техника и технология. – 2000. – Вып. 19. – С. 201 – 206.
23. Pischinger A., Pischinger F/ Der Einfud der wand bei der Verbrennung eines Brennstoffstranlesin einem Luftwirbelf/ MTZ, – 1959. – № 1.
24. Камзолов Е.П. Исследование процесса воспламенения и сгорания топлива при испарении его с нагретой стенки / Е.П. Камзолов // Известия вузов. Машиностроение. – 1961. – № 4. – С. 43–47.
25. Леонов О.В. Исследование плёночного смесеобразования / О.В.Леонов, Е.П Камзолов // Известия вузов, Машиностроение. – 1961 – № 1. – С. 86–91
26. Ермаков В.Ф. Оптимизация тепловых сопротивлений деталей цилиндров судовых дизелей / В.Ф.Ермаков // Двигателестроение. – 1979. – № 3. – С. 22–23.
27. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності / В.О. Пильов – Х.: НТУ „ХПИ”. – 2001. – 332 с.
28. Марченко А.П. Особенности математического моделирования температурной волны в поршне двигателя внутреннего сгорания /

А.П. Марченко, В.А. Пылёв, В.В. Шпаковский, В.В. Пылёв // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 1. – С. 48–53.

29. Марченко А.П. Аналіз високочастотних коливань температури в поверхневому шарі поршня з теплоізолюючим покриттям / А.П. Марченко, В.О Пильов, В.В. Шпаковський [та ін.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 65–71.

35. Марченко А.П. Эффект влияния малых толщин теплозащитного покрытия поршня на его мгновенную поверхностную температуру / А.П.Марченко, В.А Пылев, В.В. Шпаковский [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: XI междунар. научн.-практ. конф. – Владимир. – 2008. – С. 220–223.

38. Шпаковский В.В. Результаты математического моделирования температурного состояния поверхности камеры сгорания поршня с керамическим поверхностным слоем / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, В.В. Пылёв // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 3(60) – С.80–84.

39. Шпаковский В.В. Оценка влияния корундового поверхностного слоя камеры сгорания поршня на ускорение предпламенной подготовки топлива / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, В.А. Пылев, О.Ю. Линьков, В.В. Осейчук // Вестник Национ. техн. ун-та «ХПИ». – 2007. – Вып.29. – С. 115–121.

40. Меньшенин Г.Г. Снижение теплонапряжённости поршней дизелей воздушного охлаждения 8ЧВН15/16 / Меньшенин Г.Г., Меньшенин Г.Г., Рейн В.Ф.// Сборник науч. тр. по материалам междунар. конф. «Двигатель–2007», посвящённой 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., МГТУ им. Баумана. – 2007 – С. 203–208.

РАЗДЕЛ 6

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ

Тяжелонагруженные пары трения, как было продемонстрировано в ходе предшествующих исследований авторов данной работы, могут быть отработаны с помощью различных технологий упрочнения. В то же время представляет интерес, как с точки зрения науки, так – и практики, развитие предложенных способов упрочнения. Они могут совершенствоваться как каждый по отдельности, так и путем совмещения. При этом следует ожидать эффекта более ощутимого, чем от суммарного воздействия каждого из способов.

Далее на примере деталей кривошипно-шатунного механизма ДВС описывается один из способов комбинированного их упрочнения, а именно – комбинация корундирования с дискретным упрочнением ответной поверхности. Несмотря на такое частное применение, его можно рассматривать как иллюстрацию общих тенденций при применении такого типа технологий для контактирующих с трением широкого класса деталей машиностроительных конструкций.

Как уже отмечалось, двигателестроение является одной из наиболее приоритетных областей промышленности любой высокоразвитой страны. Современные двигатели включают в себя передовые достижения практически всех областей науки и техники. Высокие требования к показателям надежности, экономичности, технологичности и экологичности требуют внедрения современных технологий при их производстве начиная от структуры металла заготовок деталей, точности их изготовления и заканчивая совершенствованием физико-химических процессов сгорания различных видов топлив.

В наиболее тяжелых условиях эксплуатируются, в частности, тепловозные двигатели. Частые смены режимов работы, длительные периоды работы на холостом ходу, быстрые наборы мощности от малых нагрузок до максимальных и наоборот, – все это ведет к повышенным износам высоконагруженных трущихся пар, что существенно снижает надежность работы двигателя в целом [1].

Вопросам повышения износостойкости трущихся пар посвящено много исследований, в которых подробно рассмотрены причины увеличенных износов, возникновения задиров и даны рекомендации по повышению задиростойкости высоконагруженных пар трения [2, 3]. Самым простым, но дорогостоящим способом повышения износостойкости трущихся пар явля-

ется применение дорогостоящих высоколегированных сталей при их изготовлении, но это ведет к существенному увеличению стоимости двигателя и снижает его конкурентоспособность на рынке.

Кроме того, проблемам повышения износостойкости сопутствуют также проблемы обеспечения долговечности работы ответственных деталей двигателей по критерию усталостного разрушения, контактной прочности из-за интенсивных контактных нагрузок, в зонах сопряжения деталей двигателей (например, вал – втулка или поршень – гильза цилиндра), обеспечения приемлемого уровня КПД, лимитируемого потерями на трение и т.п.

Таким образом, упоминаемая проблема носит не узкий, а широкий, комплексный характер. При этом ее решение должно осуществляться не по одному, а по нескольким направлениям.

При эксплуатации двигателей наблюдается три стадии износа. К первой стадии относится износ трущихся поверхностей сопряженных деталей при приработке двигателя. Обычно этот период двигатели проходят в заводских условиях по специальным программам заводских сдаточных испытаний. В этот период происходит сглаживание микрошероховатостей рабочих поверхностей деталей и, в дальнейшем, интенсивность их изнашивания резко уменьшается.

Вторая стадия износа при правильной эксплуатации двигателя носит естественный характер. Ее период определяется качеством изготовления деталей, а период осмотров и ремонтов определен нормативно-технической документацией завода-изготовителя.

При дальнейшей эксплуатации высоконагруженные пары трения двигателя переходят в период интенсивного изнашивания, который при достижении предельных величин переходит к аварийным режимам эксплуатации [4].

Наиболее нагруженными являются детали кривошипно-шатунного механизма двигателя. Они определяют надежность работы и его ресурс.

Суть технологии. Специалистами НТУ "ХПИ" и ГП "Завод им. В. А. Малышева" разработаны технологии, позволяющие при минимальных энергетических затратах обеспечить высокую износостойкость рабочих поверхностей высоконагруженных пар. Так, технология гальвано-плазменного преобразования рабочей поверхности поршней, изготовленных из алюминиевого сплава АК4, позволила существенно увеличить их износостойкость. За период эксплуатации с марта 1993 года по декабрь 2012 года на маневровых тепловозах ЧМЭ-3 максимальная интенсивность износа гильз цилиндров при работе с серийными поршнями составила 0,078 мм в год, а

среднегодовая за 5-7 лет эксплуатации – 0,043. При этом максимальная интенсивность износа гильз цилиндров при работе с поршнями с корундовым слоем в среднем в 7 раз ниже. Это позволило существенно увеличить межремонтные сроки [5].

Одной из основных причин выхода из строя двигателей является износ и, вследствие этого, увеличение зазоров в паре "коленчатый вал – вкладыш подшипника скольжения". Это, в свою очередь, приводит к снижению давления масла и, по мере увеличения зазора, – к возрастанию динамических нагрузок, которые постепенно приобретают ударный характер. В результате существенно повышается износ поршневых пальцев, верхних головок шатуна, поршня и т.д.

Неравномерный износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала по его длине приводит к образованию завышенной ступенчатости между смежными шейками, что приводит к увеличению изгибающих нагрузок на коленчатый вал и может быть причиной его поломки.

Целью исследования является обоснование, исследование и доводка при производстве разработанных энергосберегающих технологий упрочнения при изготовлении и ремонте высоконагруженных деталей двигателей транспортных средств на базе технологий дискретного упрочнения (см. разд. 3) и гальвано-плазменного преобразования (см. разд. 5) трущихся поверхностей "поршень-гильза" и "шейка коленчатого вала – подшипник скольжения".

В соответствии с поставленной целью поставлены и решены следующие задачи:

- численное исследование и первичный анализ процессов контактного взаимодействия упрочненных деталей двигателей, трения и износа в их сопряжении, а также разработка рекомендаций по обоснованию технологических режимов обработки поверхностных слоев деталей с целью повышения трибомеханических характеристик высоконагруженных ответственных деталей двигателя;
- проведение испытаний образцов, изготовленных из материала поршня, вкладыша и коленчатого вала, которые были изготовлены с применением разработанных технологий;
- экспериментальная оценка повышения износостойкости исследуемых образцов;
- разработка на основе результатов проведенных исследований рекомендаций по применению технологий дискретного упрочнения и гальвано-

плазменного преобразования трущихся поверхностей высоконагруженных пар для дальнейшего применения в производстве двигателей, как альтернативных наиболее распространенным стандартным технологиям нормализации, закалки токами высокой частоты (ТВЧ), азотированию и др.

Решение поставленных задач даст возможность существенно увеличить межремонтные сроки эксплуатации двигателей, а также создать надежные триботехнические системы, которые позволяют изготавливать узлы трения, работающие до списания двигателя.

Технологии дискретного упрочнения чугунных и гальвано-плазменного преобразования алюминиевых высоконагруженных трущихся поверхностей деталей при существенном повышении твердости приповерхностного слоя не оказывает влияния на пластичность сердцевины.

Суть технологии дискретного упрочнения чугунных деталей состоит в том, что на ее поверхность электроискровым способом с электрода, выполненного из легирующего материала, на катод (поверхность детали) переносятся легирующие частицы в виде островков или линий всевозможной конфигурации, которые при попадании на поверхность быстро остывают, что приводит к появлению каверн (углублений) [6, 7]. В дальнейшем при шлифовании детали имеющиеся макро- и микродефекты удаляются, что исключает возможность появления концентраторов напряжений и улучшает качество поверхности.

Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что дискретное упрочнение образцов, выполненных из высокопрочного чугуна, обеспечивает повышение их износостойкости в 6 – 10 раз по сравнению со стандартной технологией нормализации и в 1,3 – 1,5 раза по сравнению с технологией закалки ТВЧ, а стальных образцов – в 1,6 – 3,5 раза по сравнению с азотированием. Одновременно как у чугунного, так и стального образцов улучшаются приработочные характеристики поверхностей, повышается износостойкость, снижается коэффициент трения [8 – 10].

Технология гальвано-плазменного преобразования поверхности основана на технологии микродугового оксидирования и применяется при преобразовании поверхности деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов. Обработка деталей (образцов) осуществлялась на исследовательской установке "Корунд-7", разработанной в НТУ "ХПИ" [11]. Процесс обработки осуществлялся в ваннах в щелочном электролите при рабочем напряжении 1000 – 1200 В при плотности тока до $1 \cdot 10 \text{ А/м}^2$. Технология гальвано-плазменной обработки отличается от известных методов микродугового ок-

сидирования электрофизическими параметрами процесса, конфигурацией импульсов напряжения, имеет более высокую скорость формирования корундового слоя за счет высокой плотности тока, позволяет обрабатывать относительно большие поверхности, удаляет из поверхностного слоя детали неметаллические примеси, легкоплавкие соединения, которые имеют малую адгезию к основному металлу и более низкую теплостойкость. На такой поверхности образуется слой из Al_2O_3 , имеющий высокую твердость и пористую структуру [12, 13]. После гальванического процесса поверхность полируется, что существенно улучшает ее качество.

Численные исследования. На данное время отсутствуют исследования контактно-фрикционного взаимодействия в сопряжениях, содержащих, с одной стороны, детали, обработанные по технологии дискретного упрочнения, а с другой, – обработанные по технологии гальвано-плазменного преобразования поверхности ("корундирование"). Это приводит к необходимости решения нескольких новых актуальных и важных задач. В частности, это – численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контактного сопряжения таких деталей, анализ износа и потери на трение. Следующий этап исследований – экспериментальные исследования на лабораторных образцах. Ниже представлены результаты данных исследований.

При численном исследовании напряженно-деформированного состояния получаемой системы деталей, обработанных методами дискретного упрочнения и корундирования, использовался подход и математическая модель, предложенные в разд. 2. На этой основе для механической системы, представленной на рис. 6.1, разработана конечно-элементная модель, содержащая представительный объем (рис. 6.2). Данный объем (ячейка) дает возможность на микроуровне промоделировать напряженно-деформированное состояние взаимодействующих тел, распределение контактных давлений, оценить трение и износ в сопряжении деталей, переведя исследования на реальный макромасштаб.

При задании механических свойств корундового слоя учитывалось влияние двух факторов: микрогеометрия выступов-впадин на поверхности слоя и его пористость. В зависимости от режимов технологического процесса эти величины могут изменяться в достаточно широких пределах. Для расчетных исследований используемым материалам присвоили модули упругости $E_2 = 3,45 \cdot 10^{11}$ Па, остальные материалы имели свойства $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$ Па, $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (высоколегированная сталь),

$E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па (чугун), жесткое основание – моделировалось как жесткое закрепление.

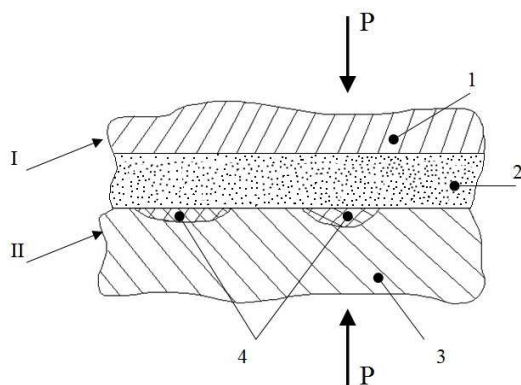


Рис. 6.1 – Схема контактного взаимодействия деталей: *I* – деталь из сплава АКЧ (1), упрочненная путем гальвано-плазменного преобразования поверхности с образованием корундового слоя (2), *II* – деталь (основной материал – сталь, чугун (3)), обработанная методом дискретного упрочнения (ДУЗ – дискретно-упрочненная зона (4))

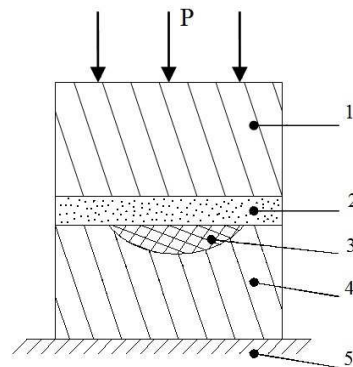


Рис. 6.2 – Схема модели представительной ячейки механической системы: 1 – АКЧ, 2 – слой Al_2O_3 , 3 – ДУЗ, 4 – основной материал, 5 – основа (жесткое основание)

На рис. 6.3 (см. цвет. вклейку) представлена геометрическая и конечно-элементная модели представительной ячейки механической системы, а также геометрическая модель с приложенными внешними нагрузками. При этом на вертикальные стенки модели накладывались условия симметрии таким образом, чтобы геометрическая модель представляла собой некоторую внутреннюю часть общей модели. Конечно-элементная модель насчитывала 200 тыс. гексагональных элементов. Прикладываемая нагрузка – 100 МПа.

По итогам расчетов определялись поля распределения компонент напряженно-деформированного состояния. На рис. 6.4 (см. цвет. вклейку) представлены распределения максимальных эквивалентных напряжений для элементов системы.

На рис. 6.5 (см. цвет. вклейку) представлены контактные давления в рассматриваемой области контактного взаимодействия элементов системы. Также по результатам проведенных расчетов были определены перемещения вдоль осевой координаты по пути, который проходил через диагональ модели, на рис. 6.6 (см. цвет. вклейку) представлены путь и перемещения (вдоль вертикальной оси отложены значения перемещений в м, а вдоль горизонтальной – длина пути, т.е. длина вдоль диагонали модели, в м).

Из анализа представленных данных видно, что в области ДУЗ (см. рис. 6.1) наблюдается более высокий уровень контактных давлений, чем в области контактирования с основным материалом детали *II*. Соответственно, если в паре "корундовый слой – сталь" коэффициент трения ниже, чем в

паре "корундовый слой – основной материал детали II", то при их взаимном движении возникает два эффекта. Первый связан с уменьшением суммарной величины трения в сопряжении деталей I и II (оценочно – в 1,2 – 1,8 раза). Второй определяет понижение износа, что объясняется более низкой интенсивностью износа высоколегированной стали по сравнению с чугуном.

Еще одним важным обстоятельством является механизм обеспечения устойчивого благоприятного комплексного эффекта от взаимодействия факторов "распределение контактного давления" – "трение" – "износ". В традиционных технологиях данная линейная последовательность факторов находится в "положительной" обратной связи: наличие значительных контактных давлений в сопряжении взаимно движущихся деталей приводит к касательным силам трения, которые вызывают износ; при износе, как указывалось выше, растут нагрузки, что, в свою очередь, приводит к росту контактных давлений и т.д. В результате получаем циклически прогрессирующий процесс по "спирали" P (рис. 6.7, а), который удаляется от номинального (исходного цикла) в процессе эксплуатации. В противовес этой тенденции для предложенной технологии реализуется иная, конкурирующая тенденция (см. рис. 6.7, б).

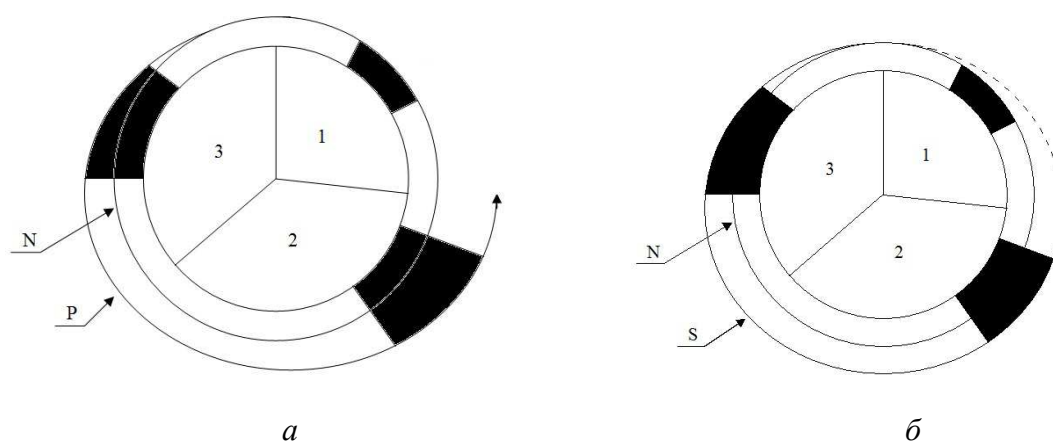


Рис. 6.7 – Механизмы развития процессов контактного взаимодействия, трения и износа: а – традиционные технологии, б – предложенная технология; 1 – контактное взаимодействие, 2 – износ, 3 – трение

В этом случае действие усилий трения вызывает рост износа основного материала 4 (см. рис. 6.2) по сравнению с износом материала ДУЗ 3. При этом материал корундового слоя 2 при достижении прирабочного предела в дальнейшем изнашивается слабо. В этих условиях происходит перераспределение контактных давлений преимущественно на область ДУЗ, общая сила трения растет медленнее, сила трения в зоне сопряжения с основным материалом уменьшается, что приводит к уменьшению его износа. Таким образом, реализуется сценарий "отрицательной" обратной связи, и развитие про-

цессов идет по линии S (см. рис. 6.7), которая удаляется от линии N медленнее, чем P . В определенных условиях это может приводить к превращению S в практически стабильную окружность, что означает реализацию установившихся процессов "контактное взаимодействие–трение–износ" (см. рис. 6.7).

Естественно, что в реальных условиях действительные процессы сочетают тенденции a и b (см. рис. 6.7). Однако важен сам механизм стабилизации B , поскольку он характеризует тенденцию к установившемуся самоповторению исследованных процессов, а не их интенсификации (что характерно для традиционных процессов обработки поверхностных слоев материалов двигателя ДВС).

Первичные оценки материалов полученных результатов дают рекомендации относительно выбора параметров технологического процесса: относительная площадь ДУЗ – 65–75%, толщина корундового слоя – 0,03–0,3 мм; пористость – 10–20 %.

Экспериментальные исследования. Для проведения испытаний на износостойкость при трении скольжения в условиях граничной смазки и смазки с абразивом были изготовлены опытные образцы из материалов "колодка" – вкладыша и "диск" – коленчатого вала.

"Диск" был изготовлен из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, поверхность которого была упрочнена методом электроискрового упрочнения с последующим шлифованием до шероховатости, соответствующей $R_a = 0,63 - 0,32$ мкм.

"Колодка" изготавливалась из сталеалюминиевой полосы с алюминиевой поверхностью АМО1-20, которая была модифицирована гальваноплазменным методом на глубину порядка 0,03-0,3 мм. Поверхность "колодки" шлифовке не подвергалась.

Режим испытаний моделировали условия работы шатунно-поршневой группы двигателя.

Испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1 при скорости скольжения 1,3 м/с. Использованы стандартные образцы:

- "диск" диаметром 50 мм, ширина 12 мм;
- "колодка" с площадью рабочей поверхности $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Схема испытаний приведена на рис. 6.8.

В результате испытаний также определялся

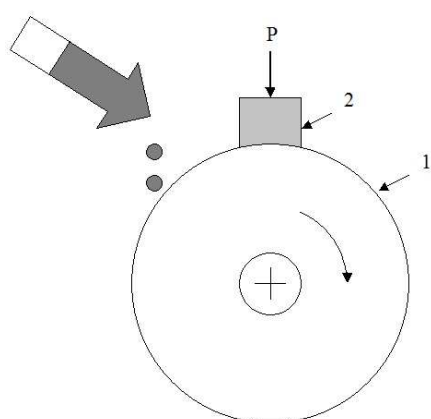


Рис. 6.8 –Схема испытаний на машине трения 2070 СМТ-1
1 – подвижный образец "диск",
2 – неподвижный образец "колодка"

коэффициент трения (f_{TP}) и было установлено, что, несмотря на повышенную твердость "колодки", при введении диспергированной добавки оксидов магния в модифицированный приповерхностный слой вкладыша из АМО1-20 происходит снижение коэффициента трения при граничной смазке во всем исследованном диапазоне нагрузок, что может быть связано с улучшением процессов микроприработки рабочей поверхности вала с образованием на его поверхности аморфированного слоя [14].

Таблица 6.1 – Результаты испытаний по определению весового износа

Материал и покрытие "колодки"	Износ "колодки", см 10^{-4}	Износ "диска", см 10^{-4}
АМО1-20	7,5 (2,5 мкм/час)	0,07 (0,023 мкм/час)
АМО1-20 + МДО	3,4 (1,1 мкм/час)	0,20 (0,07 мкм/час)

Анализ полученных результатов испытаний (табл. 6.1) дает основание для утверждения о возможном изменении характера приработочных процессов в результате существенного изменения свойств приповерхностного слоя исследуемых образцов вкладышей. Как известно [10], приработка сталеалюминиевых вкладышей состоит в переносе мягкой структурной составляющей антифрикционного сплава (олова) на сопрягаемую поверхность вала, что фактически не исправляет его макрогеометрию в процессе приработке.

При наличии на рабочей поверхности вкладыша такого корундового слоя, образованного в результате гальвано-плазменной обработки, в процессе приработки сопряжения "коленвал–вкладыш" прежде всего исправляется макрогеометрия рабочей поверхности коленчатого вала. При этом также происходит полировка и процессы микроприработки с образованием аморфизированных приповерхностных рабочих слоев, обеспечивающих высокие антифрикционные характеристики сопряжения. Наличие тонкого оксидно-корундового слоя на рабочей поверхности вкладыша в процессе приработки за счет пониженной теплопроводности корундового слоя дает возможность уменьшения относительно больших зазоров на масло, принятых при установке вкладыша коленчатого вала с антифрикционным слоем из алюминиевого сплава [15, 16]. Уменьшение величины гарантированного зазора повышает давление в системе смазки дизеля, снижает потери на трение, температуру головки поршня, шум при работе дизеля, также способствует увеличению ресурса узла "коленчатый вал – вкладыш" и "поршень – гильза" до капитального ремонта.

В качестве выводов можно заключить следующее.

Численное моделирование процессов контактного взаимодействия, трения и износа продемонстрировало наличие механизма их стабилизации в системе сопряженных деталей, обработанных методами дискретного уп-

рочнения и корундирования.

Применение пары трения – сталеалюминиевые вкладыши из АМО1-20 с корундовым слоем и коленчатый вал, изготовленный из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, поверхности коренных и шатунных шеек которого упрочнены методом дискретного упрочнения, – существенно повышают стойкость пары к задираобразованию.

При образовании на рабочей поверхности вкладыша такого корундового слоя, твердость которого существенно превышает твердость поверхности шеек коленчатого вала, в процессе приработки сопряжения коленчатый вал – вкладыш прежде всего исправляется макрогеометрия рабочей поверхности шеек коленчатого вала.

Введение диспергированной добавки оксида магния в модифицированный приповерхностный слой вкладыша АМО1-20 приводит к снижению коэффициента трения при граничной смазке во всем исследованном диапазоне нагрузок, что может быть связано с улучшением процессов микроприработки рабочей поверхности шеек коленчатого вала с образованием на их поверхности аморфизированного слоя.

Результаты проведенных численных исследований и экспериментальных испытаний свидетельствуют о целесообразности применения гальвано-плазменной обработки сталеалюминиевых вкладышей в паре с чугунным коленчатым валом, шейки которого упрочнены методом дискретного упрочнения.

Применение исследованных методов модифицирования рабочей поверхности вкладыша и упрочнения шеек коленчатого вала может позволить снизить относительно высокие зазоры на масло, принятые при установке сталеалюминиевых вкладышей.

В результате предложенная комбинированная технология продемонстрировала высокие потенциальные возможности для повышения трибомеханических характеристик трущихся тяжелонагруженных деталей машин.

Литература к разделу 6

1. Синенко Н. П., Гринсберг Ф. Г., Половинкин И. Д., Розенблит Г. Б., А. М. Скаженик. Исследование и доводка тепловозных двигателей. – М.: Машиностроение, 1975. – 184 с.
2. Основы трибологии. Трение, износ, смазка. / Под ред. А. В. Чичинадзе – М.: Центр "Науки и техники", 1995. – 400 с.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
4. Кузнецов А. С. Ремонт двигателей внутреннего сгорания: учебн. пособие / А. С. Кузнецов – М.: изд. центр "Академия", 2011. – 64 с.

5. Шпаковский В. В. Внедрение поршней с корундовым слоем при ремонте дизелей тепловозов ЧМЭ-3 / В. В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. - №12. С.112–115.

6. Парсаданов И. В. Научное обоснование параметров дискретного упрочнения високонагружених деталей транспортних енергетических установок / И. В. Парсаданов, С. А. Кравченко, Н. А. Ткачук, В. Н. Шеремет // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2012. - №1 (6). С. 298-310

7. Тартаковский Э. Д. Анализ эффективности существующих методов ремонта коленчатых валов дизеля 5Д49 / Э. Д. Тартаковский, В. Г. Гончаров, В. М. Сапожников // Зб. наукових праць. – Харків: УДАЗТ, – 2009. Вип. №107. С. 71–79.

8. Посвятенко Е. К. Підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей форсованих дизелів / Е. К. Посвятенко, В. Г. Гончаров, С. С. Д'яченко, М. А. Ткачук // Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. наукових праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. Вип. №5.–С.60-75.

9. Гончаров В. Г. Повышение надежности деталей двигателя методом дискретного упрочнения / С. А. Кравченко, В. Г. Гончаров // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – №1. – С. 97-99.

10. Дьяченко С. С. Исследование ремонтпригодности тепловозного коленчатого вала / С. С. Дьяченко, Б. В. Савченко, И. Г. Гончаров, И. В. Понамаренко, С. И. Аксенова, В. М. Сапожников // Локомотивинформ. – 2007. август.– С. 16-17.

11. <http://web.kpi.kharkov.ua/diesel/549-2/>.

12. Шпаковский В. В. Повышение ресурса и снижение расхода топлива ДВС путем применения частично-динамической теплоизоляции камеры сгорания. Учебн. пособие по курсу "Особенности эксплуатации и ремонта современных двигателей внутреннего сгорания" / Харьков. НТУ"ХПИ". – 2013. – С. 132.

13. Веретельник О.В. Контактное взаимодействие поршня с гальваноплазменной обработкой боковой поверхности со стенками цилиндра ДВС / О.В. Веретельник, Н.А. Ткачук, С.Ю. Белик // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тем.вип.: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 22. – С. 32–39.

14. Шпаковский В. В. Снижение коэффициента трения коленчатый вал - вкладыш двигателей магистральных тепловозов применением дискретного упрочнения и гальваноплазменной обработки / В. В. Шпаковский, С. А. Кравченко, А. К. Олейник // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – №1 – С. 98-101.

15. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы: – М.: Транспорт, 1967.–С. 224.

16. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах (транспортная техника): – М.: Транспорт, 1987.–С. 223.

РАЗДЕЛ 7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

7.1. Развитие принципов исследования процессов холодного пластического деформирования применительно к машиностроению

Как уже отмечалось, в отличие от других способов инженерии поверхности деталей машин, относящихся к группе модифицирования, этот процесс может быть формообразующим, т.е. заготовка может получать новые нужные размеры [1–3].

Современные технологии ХПД характеризуются процессами формообразования заготовок, в которых реализуется течение материалов со сложной реологией в условиях сложного нагружения. Поэтому их разработка, изучение и усовершенствование невозможны без применения как традиционных теорий пластичности и обработки металлов давлением, расчетно-экспериментальных методов, так и создание новых подходов для решения разных прикладных задач.

Принципиально новые технологические процессы, основой которых являются методы ХПД, сопровождаются разрушением металла в процессе его обработки, потерей стойкости заготовок, увеличением зерен металла после термообработки, критической пористостью, возникающей в процессе формообразования порошковых материалов и т.п.

Перечисленные проблемы могут быть решены при помощи феноменологической теории деформирования, которая является по сути новым разделом прикладной теории пластичности.

Применение теории деформирования для решения технологических задач позволяет дать ответ не только на вопросы определения условий граничного формообразования. Оценка пластичности материала заготовки важна также в тех случаях, когда после ХПД применяется термообработка, поскольку свойства материала после термообработки зависят от степени использования запаса пластичности, полученного на предыдущих операциях, т.к. известно, что существуют критические значения, превышение которых приводят к резкому ухудшению механических свойств материала.

Еще одна задача состоит в оценке остаточной пластичности в разных геометрических плоскостях детали. Это необходимо для определения возможностей реализации следующей операции, связанной с пластическим деформированием, а также получением изделий с необходимыми физико-механическими характеристиками.

Для оценки деформируемости заготовок и обеспечения благоприятной технологической наследственности необходимо изучить историю деформирования материальных частиц заготовок в опасной области, т.е. определить тензорные поля напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} как функций координат и времени. При решении этих задач для технологических процессов, сопровождающихся сложным нагружением и немонотонным деформированием, возникают проблемы надежного расчета компонент девиатора напряжений (S_{ij}). В этих условиях известные физические уравнения не могут в достаточной степени описать связь S_{ij} и ε_{ij} . Поэтому, следует применить модели Г. Бакхауза, учитывающие эффект Баушингера. Тогда, кроме прочего, возникает возможность использовать постулат изотропии Ильюшина и ввести поправки, уменьшающие степень расхождения векторов напряжений и скоростей деформаций.

Учитывая сказанное, определена разработка общих подходов к исследованию процессов ХПД, характеризующихся формообразованием заготовок в условиях сложного нагружения, немонотонного деформирования и, в некоторых случаях, близостью к разрушению материала в наиболее опасных областях.

Анализ механики формообразования изделий в условиях сложных процессов ХПД (рис. 7.1) показывает, что при создании высоких технологий существует проблема недостатка научных знаний и методов в области расчетов и проектирования технологических процессов обработки металлов давлением, а также определение граничных возможностей формообразования заготовок в условиях объёмного напряженного состояния, близкого до истощения ресурса пластичности [4–10]. Это, в свою очередь, вызывает необходимость создания основ теории деформируемости заготовок сложного профиля в условиях граничного формообразования, которая, в частности, может дать возможность проведения оценок вероятности разрушения в наиболее опасных областях деформирования и получения изделий с заданными характеристиками пластичности [11].

Поскольку исследование данных процессов требует учета многих факторов (табл. 7.1), важно выбрать показатель, который более всего влияет на качество. Таким, может быть использованный ресурс пластичности ψ , который накладывает соответствующие ограничения на каждый технологический процесс (рис. 7.2). Например, это касается процесса получения внутреннего шлицевого профиля – степень обжатия за один проход или при реализации обкатывания пары поршень-шатун – продольная подача ролика и др.

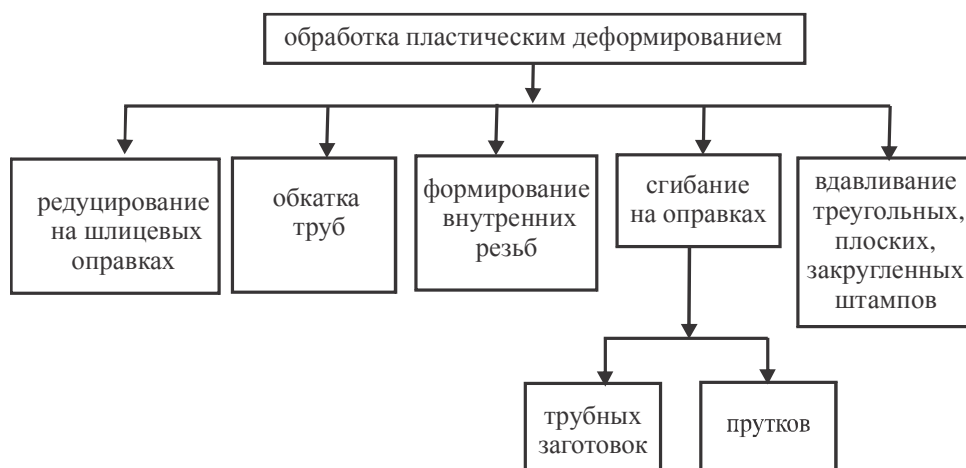


Рис. 7.1 – Исследуемые процессы

Таблица 7.1 – Сравнительная характеристика процессов

Процесс	Традиционное исполнение	Новые технологии	Преимущества	
Нанесение внутреннего шлицевого профиля на трубной заготовке	деформирующе-режущее протягивание	обжатие на жесткой оправке	возможность управления физико-механическими характеристиками, повышение производительности	экономия металла, повышение прочности, уменьшение шероховатости, снижение энергозатрат
Формообразование внутренней резьбы	резание, раскатывание	выдавливание резьбообразующими пластинами		повышение статической усталостной прочности, стабильность размеров
Изгибание труб и прутков на оправках	в горячем состоянии	в холодном состоянии на жестких оправках		отсутствие сложного оборудования, снижение энергозатрат, экологическая безопасность
Обкатывание пары поршень-шатун	обкатывание роликами труб	получением нужного сложного профиля		повышение характеристик прочности

Исходя из изложенного, практическое значение имеет использование экспериментально-теоретических исследований по определению зависимостей влияния основных технологических факторов каждого процесса на величину ψ . Это дает возможность выбирать оптимальную схему деформирования и за счет рационального построения технологических операций прогнозировать получение изделий с необходимыми характеристиками.

Такая постановка задач вызывает необходимость не только разработ-

ки физико-математических моделей для расчета НДС, силовых характеристик, исследований стойкости заготовок, но и использования существующих критериев разрушения и создания новых, которые бы в полной мере учитывали влияние определяющих факторов: инвариантов тензора напряжений на ресурс пластичности в опасных областях деформирования, монотонность нагружения и нелинейность накопления повреждений. Для исследуемых процессов представляют практический интерес оценки параметров анизотропии пластичности, остаточной пластичности при формировании заготовок. При этом необходимо использовать тензорные модели о накоплении повреждений в деформированном металле. Возможным является также проведение оценок влияния термообработки на возобновление запаса пластичности в наиболее опасных областях, с позиции разрушения [12].



Рис. 7.2 – Научные подходы к решению поставленных задач

Таким образом, разработка и использование критериев разрушения дает возможность всестороннего изучения условий деформирования заготовок и закономерностей накопления повреждений, которые приводят к разрушению в наиболее опасных областях, их зависимостей от схемы напряженного состояния и истории нагружения. И так, проведение исследований в этом направлении имеет практическое значение для оптимизации и усовершенствования опытных процессов.

Изложенные научные положения позволили разработать научно обоснованные комплексные подходы к решению технологических задач с применением феноменологической теории деформирования и расчетно-экспериментальных методов: совместного решения уравнений равновесия и условий пластичности, линий скольжения, разделяющих сеток, определение НДС по распределению твердости, конечных элементов [13].

Рекомендуется следующий алгоритм для изучения процессов холодной объемной штамповки заготовок, деформирующихся в условиях сложного нагружения и немоного деформирования.

1. Проведение поэтапных экспериментальных исследований с разрезанием заготовок в различных направлениях. При этом использование метода определения НДС по распределению твердости дает возможность изучения полей интенсивности напряжений и деформаций (дана информация может быть использована для расчета НДС на различных стадиях формообразования заготовок), а метод разделяющих сеток – для поэтапного изучения накопленной интенсивности деформации и получения информации о реальной кинематике течения металла.

2. Разработка методик расчетов НДС на разных стадиях формообразования заготовок опытных процессов с учетом упрочнения материалов при пластическом деформировании.

3. Определение характеристик технологического паспорта материала (параметров кривых течений, диаграмм пластичности, кривых Баушингера). Под технологическими функциями свойств материалов принимаются экспериментально полученные диаграммы пластичности и кривые течения, учитывающие пластичность при различных показателях напряженного состояния и упрочнения материалов. Аппроксимации данных функций могут быть использованы в расчетах. Характеристиками технологического паспорта материалов являются: для кривых течений – коэффициенты A и n , где A – напряжение текучести при деформации, равной “1”, n – критическая деформация при максимальном нагружении на кривой растяжения. Связь между зна-

чениями интенсивности напряжений – интенсивности деформаций может быть выражена зависимостью $\sigma_u = Ae_u^n$. Для диаграммы пластичности – значения граничных деформаций при сжатии $e_{p(\eta=-1)}$, кручении $e_{p(\eta=0)}$, растяжении образцов $e_{p(\eta=1)}$, методика определения которых приведена в работе [14].

Одним из проявлений деформационной анизотропии металлов при их пластическом деформировании есть эффект Баушингера. Экспериментальные данные [15] свидетельствуют о зависимости параметра, который характеризует этот эффект, от вида напряженного состояния, реализуемый при реверсивной пластической деформации. Методики оценки данного эффекта для разных видов напряженного состояния, а также условий немонотонного пластического деформирования приведены в работе [16].

4. Определение опасных областей деформирования заготовок с использованием разных показателей напряженного состояния (опасной областью считается та, в которой показатели напряженного состояния приобретают максимальные значения с учетом знака). В технологической практике нашли широкое применение феноменологические теории, в основе которых лежит гипотеза о зависимости пластичности от истории нагружений. Характеристиками напряженного состояния могут быть показатели, которые позволяют исследовать траектории нагружения не в пространстве тензора напряжений, а в пространстве его инвариантов. Практический интерес представляет оценка возможности использования диаграмм пластичности, построенных в условиях плоского или линейного напряженных состояний для оценки деформирования металлов, деформированных в условиях объёмного напряженного состояния. Решение такой задачи связано с трудностями, которые возникают при проведении специальных экспериментальных исследований в камерах высокого давления. В наших исследованиях показано, что зависимость пластичности от схемы напряженного состояния можно характеризовать двумя показателями напряженного состояния, а также обосновано, что при объёмном напряженном состоянии необходимо учитывать влияние на пластичность третьего инварианта тензора напряжений. Указанные подходы допускают поэтапное определение в опасной области деформирования значений накопленной степени деформации и показателей напряженного состояния.

5. Построение пути деформирования опасной области в координатах: степень деформации e_u – показатель напряженного состояния η с дальнейшей их аппроксимацией.

6. Определение на стадиях формообразования заготовок использован-

ного ресурса пластичности по критериям разрушения с применением полученных ранее характеристик технологического паспорта материала и траектории пути деформирования опасной области. В работах [13–18] обосновывается использование критериев, основой которых является тензорный аппарат накопления повреждений, при этом учитывается их направленность и история деформирования опасных областей.

7. Определение аналитических зависимостей между значениями использованных ресурсов пластичности и основными параметрами технологических процессов, формой инструмента.

8. Изучение возможностей максимального сохранения пластичности в опасной области. Рекомендуется применять два подхода:

– выбор материалов с высокими значениями граничных деформаций, при этом следует учитывать, что новые материалы могут иметь высокие показатели упрочнения в процессе ХПД по сравнению с традиционными, а это может привести к возрастанию усилий и нагрузок на инструмент; таким образом, для каждого конкретного случая необходимо проведение экономических расчетов;

– использование установленных аналитических зависимостей Ψ от основных параметров технологического процесса и формы инструмента для изменения направления пути деформирования в отрицательную область показателей напряженного состояния (в координатах $e_u - \eta$).

Таким образом, создание новых и усовершенствование известных технологических процессов на основе ХПД требует разработок расчетных методик, при помощи проектирования процессов определять ресурс пластичности материалов, а также прогнозировать технологическую наследственность заготовок без проведения трудоёмких экспериментальных исследований.

Определены направления решений технологических задач, включающих использование феноменологической теории деформирования в сочетании с расчетно-экспериментальными методами и характеристиками технологического паспорта материала.

Полученные зависимости граничных характеристик формообразования заготовок от технологических факторов дают возможность усовершенствовать исследуемые процессы и определять рекомендации, касающиеся их рационального построения.

При исследовании технологических процессов, когда формообразование заготовок происходит в условиях объёмного напряженного состояния и сложного нагружения, необходимо учитывать влияние инвариантов тензора

напряжений на ресурс пластичности, нелинейность накопления повреждений и немонотонность нагружения. Разработка и применение критериев разрушения является важным для развития теории и практики обработки металлов давлением и других процессов ХПД.

7.2. Применение холодного пластического деформирования в процессах со сложным нагружением и немонотонным деформированием

Холодное пластическое деформирование (ХПД) среди способов модификации поверхностного слоя имеет ряд существенных особенностей и преимуществ, которые заключаются в следующем. Процесс осуществляется при обычных температурах, благодаря чему деталь не подвергается термическому воздействию. Для реализации ХПД используется серийное оборудование: станки, прессы, волочильные станы и тому подобное. В отличие от других способов модификации, этот процесс может быть формообразующим, то есть заготовка может получать новые нужные размеры [1].

В период с конца 80-х годов прошлого века по настоящее время авторами данной работы и под их руководством было проведено фундаментальное теоретико-экспериментальное исследование ХПД как одного из методов инженерии поверхности деталей машин [19–25]. Результаты этого исследования были широко внедрены в производство при изготовлении и восстановлении поршневых пальцев, коромысел клапанов, поршней, гильз гидро- и пневмоцилиндров и амортизаторов, втулок балансира и звеньев гусениц тракторов, других деталей ДВС и средств транспорта в целом. При этом процессы ХПД были направлены как на получение гладких цилиндрических отверстий, так и цилиндрических отверстий с системами регулярных канавок для улучшения смазки подвижных контактов пар трения.

Наши исследования показали, что ХПД можно применять не только для обработки осесимметричных цилиндрических поверхностей, но и для получения более сложных профилей, а также для формирования неразъемных соединений. Поэтому ниже проанализированы отдельные случаи нового применения ХПД.

Нами с соавторами были выполнены следующие работы:

- исследовано напряженно-деформированное состояние при поэтапном формировании заготовок шлицевого профиля карданного вала дизель-поезда экспериментально-расчетным методом с использованием метода твердости и применением дифференциальных уравнений равновесия, условий пластичности для плоского деформированного состояния [26];
- оценена деформируемость металла при обжатии матрицей втулки и вдавли-

ливании шлицевой оправки в пластичный материал на стадиях формирования внутреннего шлицевого профиля [27];

– дана расчетная оценка влияния промежуточных отжигов на восстановление запаса пластичности стали 20Х;

– даны рекомендации по совершенствованию технологического процесса формирования внутреннего шлицевого профиля [27].

Суть процесса (рис. 7.3) состоит в том, что трубная заготовка 1 вместе с размещенной внутри с минимальным зазором шлицевой оправкой 2 проталкивается через деформирующую матрицу 5. После обжатия по всей длине изделия (осуществляется несколько проходов через различные рабочие диаметры матриц) оправка выпрессовывается. Процесс позволяет получать изделие повышенной точности без дальнейшей чистовой обработки в серийном и массовом производствах и может быть осуществлен на вертикально-протяжных станках или на гидропрессах.

Разработана также новая технология получения крутоизогнутых колен методом ХПД [28], которая позволяет изготавливать колена с себестоимостью в 2-5 раз меньше по сравнению с существующими технологиями. Технология является know-how, которой нет аналогов.

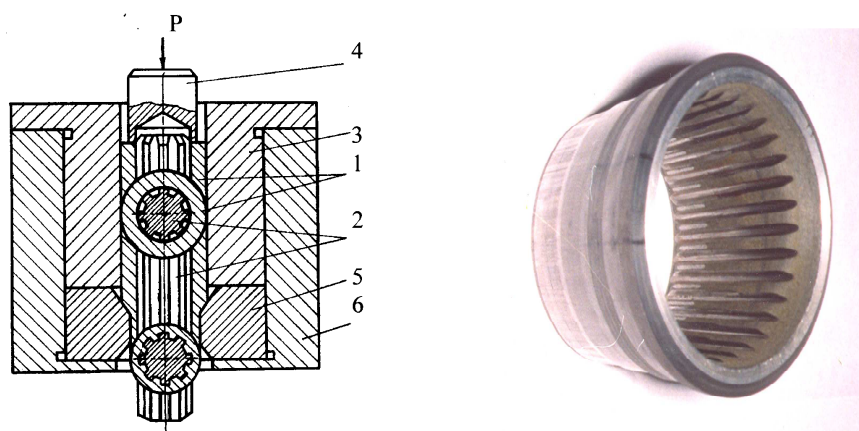


Рис. 7.3 – Схема формирования внутренних шлицев в трубной заготовке шлицевого соединения карданного вала дизель-поезда ДП-2

Способ позволяет изготавливать изделия с минимально допустимым радиусом изгиба в диапазоне внешних диаметров $D = 20\text{--}219$ мм с толщиной стенок $(0,03\text{--}0,075) D$ и углами изгиба от 45° до 90° из различных марок сталей, в том числе и нержавеющей. Способ основан на применении устройства выполненного по схеме, сочетающего в себе деформирующее протягивание из ограничения укорочения заготовки [29] и метода наматывания труб. Применение деформирующего протягивания позволяет использовать процесс потери устойчивости заготовки для формования изделия с мини-

мально допустимым радиусом изгиба. Основным элементом технологического оборудования разработанного способа является устройство, схема, внешний вид и элементы которого показаны на рис. 7.4.

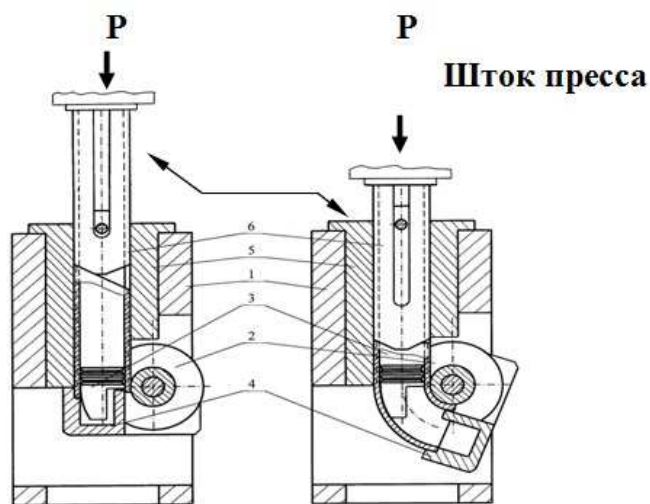


Рис. 7.4 – Схема устройства для формообразования крутоизогнутых труб методом ХПД: 1 – корпус, 2 – ролик, 3 – деформирующий элемент, 4 – рычаг, 5 – гильза, 6 – толкатель

Устройство состоит из корпуса 1, в котором закреплены вращающийся ролик 2 и деформирующий элемент 3. Рычаг 4 установлен на одной оси с роликом. В центральное отверстие корпуса вставлена гильза 5 с закрепленным на ней деформирующим элементом, являющимся направляющей для толкателя 6. В начальный момент работы рычаг находится в горизонтальном положении. Трубная заготовка устанавливается на гладкой части деформирующего элемента. Шток пресса давит на торец толкача, заготовка проходит по рабочей части деформирующего элемента, в результате чего происходит раздача и калибровка ее отверстия. При дальнейшем перемещении заготовка входит в захватный участок рычага и совместно с ним перемещается по рабочей поверхности ролика. При этом часть радиуса деформирующего элемента препятствует получению овальности изделия выше пределов допуска и предотвращает возникновению гофр в месте изгиба. После окончания формирования готовое изделие удаляется через окно в корпусе.

Были также проведены исследования процесса соединения поршня с шатуном аксиально-роторным поршневым насосом путем закатывания.

Выполнены следующие работы:

- проведены исследования стадий формирования изделий;
- разработана математическая модель для определения НДС в области кон-

такта инструмент-деталь и прилегающей поверхности;

- определены опасные области деформирования (с позиции разрушения);
- проведена оценка деформируемости изделий с целью обеспечения качества и благоприятной технологической наследственности готовых изделий;
- даны практические рекомендации по совершенствованию технологического процесса.

Технологические процессы обкатывания труб, холодной раскатки прецизионных заготовок и кольцевых деталей, закатывания пары поршень-шатун аксиально-роторного поршневого насоса является разновидностью обработки металлов давлением и содержат изменения формы заготовок в соответствии с необходимыми очертаниями изделий путем периодического обжатия рабочими органами, осуществляющих относительно оси заготовки радиальное вращательное движение. Заготовка при этом может оставаться неподвижной, или совершать вращательное движение.

Обкатывание – скоростной высокоточный метод изготовления деталей постоянного и переменного поперечного сечения из простых исходных заготовок. С помощью технологического процесса обкатывания труб, раскатки заготовок получают различные полые осесимметричные металлоизделия. Указанные процессы объединяет механизм деформации, а именно: в них реализуется две деформации сжатия и одна – растяжения. Такая механическая схема деформации создает благоприятные условия для пластической деформаций, так как затормаживаются межкристаллические сдвиги, приводящие к нарушению механических связей, и пластическая деформация протекает в основном за счет внутрикристаллических сдвигов.

Процесс обкатывания сводится к пластическому изменению формы путем перемещения частиц металла. При этом происходит уменьшение поперечного сечения и соответствующего ему удлинения заготовки за счет перемещения металла вдоль оси в двух противоположных направлениях. Применение обкатывания как метода обработки возможно для материалов, подвергающихся не только значительной пластической деформации, но и имеющих некоторый уровень хрупкости. Как заготовку применяют холодноотянутые или калиброванные стали. При обкатывании сохраняется объем, увеличивается прочность металла, в то время, как при обработке металлов резанием происходит уменьшение первоначального объема, а также ухудшение исходного качества металла из-за перерезания волокон.

Холодная деформация при обкатывании в значительной степени влияет на изменение физико-механических свойств металла. Все показатели

сопротивления деформации увеличиваются. Это объясняется упрочнением, повышающим сопротивление сдвигу, а следовательно, повышающим все механические характеристики.

Операцию закатывания поршня с шатуном выполняют на резьбонакатном станке ГД-8. При этом собранная деталь поршня с шатуном 2 (рис. 7.5) устанавливается в устройство АП-999 резьбонакатного станка ГД-8 на стол 3 с фиксацией осевого положения (размер "а") пружинным подпором 5. Прижимной ролик 1 вращается с одинаковой скоростью с закаточным роликом 4 и при этом вращает собранную деталь 2. Закаточный ролик 4 с определенной скоростью подводится гидроцилиндром к поверхности поршня и вдавливается в глубину "б", которую регулируют гайкой 7 относительно жесткого упора 6.

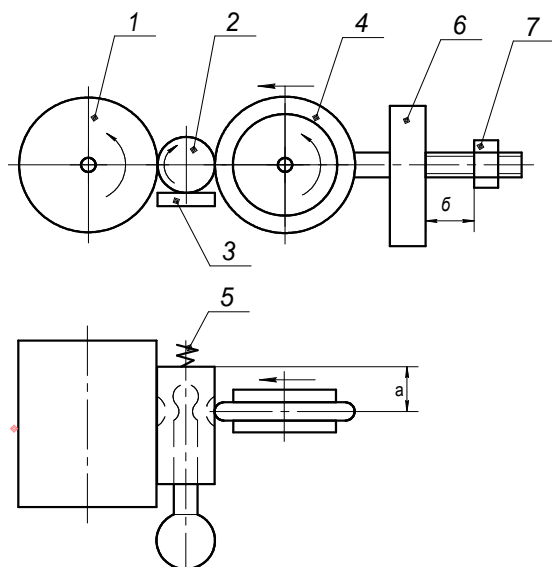


Рис. 7.5 – Схема устройства АП-999 резьбонакатного станка ГД-8 для закатывания поршня с шатуном:
1 – прижимной ролик; 2 – собранная деталь поршня с шатуном; 3 – опора для детали (стол); 4 – закаточный ролик АР-1749; 5 – подпорная пружина; 6 – жесткий упор; 7 – гайка

После достижения упора давление в полости приводного гидроцилиндра начинает расти, и при величине давления настройки срабатывает реле давления, обеспечивающее включение реле времени. Настроенное реле времени задается продолжительностью паузы (выхаживания заготовки). После паузы закаточный ролик возвращается в исходное положение, деталь снимают со станка и проводят контроль изделия.

На рис. 7.6 (см. цветн. вклейку) показан разрез поршня-шатун после операции закатывания.

Исследованные нами процессы принадлежат к обработке металлов давлением в холодном состоянии, то есть характеризуются формообразованием заготовок при сложной нагрузке, в которых монотонное деформирование сменяется немонотонным и наоборот. При этом некоторые технологические операции требуют термообработки. Поэтому для предотвращения

разрушения изделий и потери их устойчивости, возникла необходимость разработки новых подходов для решения прикладных технологических задач, содержащих сочетание известных теорий, включая феноменологическую теорию деформируемости и расчетно-экспериментальных методов. Такие исследования нами начаты [30].

Создание новых и усовершенствование известных технологических процессов на основе ХПД требует разработок расчетных методик, с помощью которых становится возможным еще на стадии проектирования процессов определить ресурс пластичности материалов, а также прогнозировать технологическую наследственность заготовок без проведения трудоемких экспериментальных исследований.

7.3. Бесстружечная обработка фасонных отверстий деталей машин

В технологической практике широкое применение нашли феноменологические теории, в основе которых лежит гипотеза о зависимости пластичности от истории нагрузок, которая задается в пространстве напряжений. Характеристиками напряженного состояния могут быть его показатели, позволяющие исследовать траектории нагрузок не в пространстве тензора напряжений, а в пространстве его инвариантов. Имеет практический интерес проведение исследований, результаты которых позволяют оценивать возможности применения диаграмм пластичности, построенных в условиях плоского или линейного напряженных состояний для оценки деформируемости металлов, деформированных в условиях объемного напряженного состояния. Решение такой задачи связано с трудностями, возникающими при проведении специальных экспериментов в камерах высокого давления. В работе [31] показано, что зависимость пластичности от схемы напряженного состояния можно характеризовать двумя показателями напряженного состояния. Установлено, что при объемном напряженном состоянии необходимо учитывать влияние на пластичность третьего инварианта тензора напряжений [32], представленные результаты исследований зависимости пластичности от инвариантов тензора напряжений при гидростатической обработки металлов, а также методика построения объемной диаграммы пластичности для условий объемного напряженного состояния. Результаты названных работ позволяют по обычным диаграмм оценивать предельную деформацию в случае объемного формообразования при условиях $\eta = \text{const}$, $\chi = \text{const}$, $H = 0$ (соответственно два безразмерные показатели напряженного состояния и параметр, характеризующий траекторию кривизны деформации).

При традиционных исследованиях процесс погрузки задается шестью

функциями времени $\sigma_{ij}(t)$ или пятью функциями $S_{ij}(t)$ и независимой функцией времени $\sigma(t)$, требующий изучения большого количества траекторий. Установлено, что при одних и тех же условиях формообразования траектории нагрузок для различных материалов могут быть различными, а это требует дополнительных исследований и создания громоздкого математического аппарата для описания каждого из процессов.

В связи с изложенным для задания траектории в пространстве напряжений предлагаем использовать два безразмерных показателя напряженного состояния [32]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}; \quad \chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (7.1)$$

Основное преимущество подхода, при котором траектория нагрузки задается не в шестимирном пространстве напряжений, а в пространстве безразмерных показателей η и χ заключается в том, что в последнем случае вид траектории нагрузки однозначно определяется условиями формообразования, характерными для исследуемого процесса, и практически не зависит от механических свойств деформированного металла. Это дает широкие возможности для компьютерного моделирования и выбора оптимального материала для изделия, для чего необходимо знать параметры коэффициентов аппроксимации кривой течения и поверхности предельной пластичности. К тому же такой подход значительно сокращает количество трудоемких экспериментальных исследований. Еще одним преимуществом является то, что как показано в работах [27, 33, 34], а также в нашем исследовании – свойства исследовательских материалов мало влияют на пути деформирования в опасных областях (в наиболее близких к разрушению) – отклонения составляют не более 5%, что согласуется с результатами, приведенными в работах для процессов осаждения, поперечного выдавливания, холодной высадки и др. Построив пути деформирования для опасной области одного исследовательского материала, можно в той же системе координат на тот же график наносить диаграммы пластичности других материалов, и по изложенным ниже методиками определять суммарный использованный ресурс пластичности, то есть целесообразность выбора материала для данного процесса.

Например, рассмотрим процесс формообразования внутреннего шлицевого профиля на трубной заготовке методом холодного пластического деформирования. Нами разработан технологический процесс формообразования внутренних шлицев в трубных заготовках методом их обжима матри-

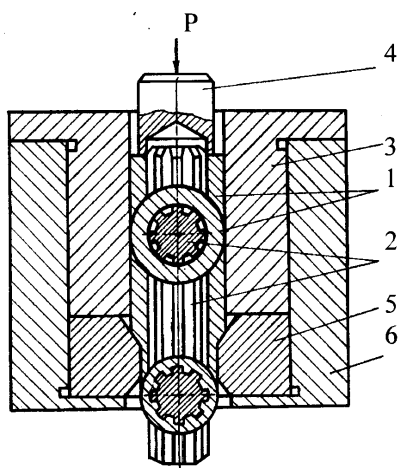


Рис. 7.7 – Схема процесса формообразования внутренних шлицев в трубных заготовках

цей на профильную шлицевую оправку (методом «охватывающего» протягивания) [30]. Суть процесса (рис. 7.7) состоит в том, что трубная заготовка 1 вместе с расположенной внутри с минимальным зазором шлицевой оправкой 2 по направляющей втулке 3 проталкивается пуансон 4 через деформирующую матрицу 5, которая располагается вместе с направляющей втулкой в обойме 6. После обжима по всей длине изделия оправка выпрессовывается. Данным способом формировали прямобочный шлицевой профиль, соответствующий профилю втулки карданного вала рулевого управления автомобиля. Процесс может быть выполнен на вертикально-протяжных станках или на гидропрессах и рекомендуется как высокопроизводительный, что позволяет получать шлицевые втулки повышенной точности без дальнейшей чистовой обработки в массовом производстве (рис. 7.8, см. цветн. вклейку).

Однако, в данном процессе осевые и радиальные усилия достигают порядка 250 кН, а контактные давления 1 ГПа, что может негативно повлиять на долговечность оборудования и оснастки. Шлицевая оправка изготавливается сплошной, поэтому при выработке шлицев или повреждении одного из них она становится непригодной для дальнейшего использования. Известно, что при обработке холодным пластическим деформированием снижается шероховатость поверхности, повышается ее твердость и износостойкость, создаются остаточные напряжения необходимого знака, осуществляется объемная пластическая деформация всей толщины детали, приводящая к повышению ее прочности. Однако, с повышением характеристик прочности материала (предела прочности σ_b , предела текучести σ_t , твердости $HВ$) наблюдается снижение пластических характеристик (относительного удлинения δ и относительного сужения ψ).

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что для данного процесса важно всестороннее изучение механики формообразования изделий по проведению оценки их качества и исследования возможности усовершенствования самого процесса.

В случае объемного формообразования поверхность пластичности зависит от истории деформирования, которая определяется изменением по-

казателей напряженного состояния при росте накопленной интенсивности деформаций. Поверхность пластичности в этом случае не является фиксированной и может быть построена с помощью критерия деформируемости, что может предусматривать положения точки поверхности разрушения с учетом истории деформирования.

Оценка технологической прочности может быть осуществлена, если известна зависимость η от накопленной степени деформации в наиболее опасной области деформирующейся заготовки, величины характерной деформации и других параметров процесса. Последние влияют на напряженное и деформированное состояние в этой зоне. Такими параметрами при вдавливании шлица является угол профиля зуба, контактное трение, вид смазочного материала и др. Анализ напряженного состояния показал [35], что наиболее опасны области контакта шлица оправки и пластической области и область наростообразования (изображена полукругом под шлицем, рис. 7.9)

В этих областях параметр напряженного состояния достигает наибольшего (с учетом знака) значения, следовательно, эта область является жесткой. В процессе исследования изучалось движение точек опасных областей в физической плоскости с помощью моделирования на составляющих образцах и в плоскости показателей \bar{e}_z ; η ; χ [27]. Для точки 1 начальным положением было принято такое, как показано на рис. 7.9. При вдавливании на глубину $h = 1,5$ мм последняя попадает в точку 2, при этом параметры следующие: $e_i = 0,28$; $\sigma_i = 610$ МПа; $\sigma_0 = -290$ МПа; $\eta = -1,42$. При дальнейших вдавливаниях точка 1 проходит последовательно точки 3, 4, 5, которые ограничивают область наростообразования. Данные для построения пути деформирования приведены в табл. 7.2, в которой представлены также данные для области наростообразования.

В таблицах 7.2 и 7.3 представлены данные расчета для построения поверхности (плоскости деформирования) для точек 1, 2, 5 с учетом перемещения их в физической плоскости. Исходным положением точки 2 было расстояние r (рис. 7.9). При вдавливании на глубину $h = 1,5$ мм точка попадает на начало сходящегося канала. Дальнейший расчет для последней проводился как для подвижной границы сходящегося канала. Для точки 5 расчет проводился как для подвижной от начала до конца сходящегося канала.

Таблица 7.2 – Параметры пути деформирования точки 1 и области наростообразования

Точка 1	e_z	0,28	0,3	0,35	0,4	0,45
	η	-1,42	-1,45	-1,47	-1,49	-1,5
Область наростообразования	e_u	0,0045	0,2	0,28	0,33	0,45
	η	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5

Таблица 7.3 – Данные для построения плоскости деформирования для точек 2, 5

Результаты расчета для точки 2								
h, мм	e_u	σ_u , МПа	σ_ρ , МПа	σ_θ , МПа	σ_0 , МПа	η	$\tau_{\rho\theta}$, МПа	χ
1,5	0,28	610	0	– 600	– 305	– 1,5	90	0,22
1,7	0,32	620	100	– 510	– 200	– 1	77	0,366
1,8	0,35	630	120	– 510	– 190	– 0,92	76	0,374
2,3	0,4	650	160	– 490	– 160	– 0,75	73	0,37
2,7	0,45	660	180	– 480	– 150	– 0,67	71	0,36
Результаты расчета для точки 5								
1,5	0,13	550	120	– 430	– 150	– 0,83	74	0,373
1,8	0,28	610	160	– 430	– 138	– 0,7	69	0,35
2	0,33	630	180	– 450	– 130	– 0,63	67	0,36
2,4	0,4	650	240	– 410	– 85	– 0,4	61	0,316
2,7	0,45	660	300	– 360	– 13	– 0,13	54	0,226

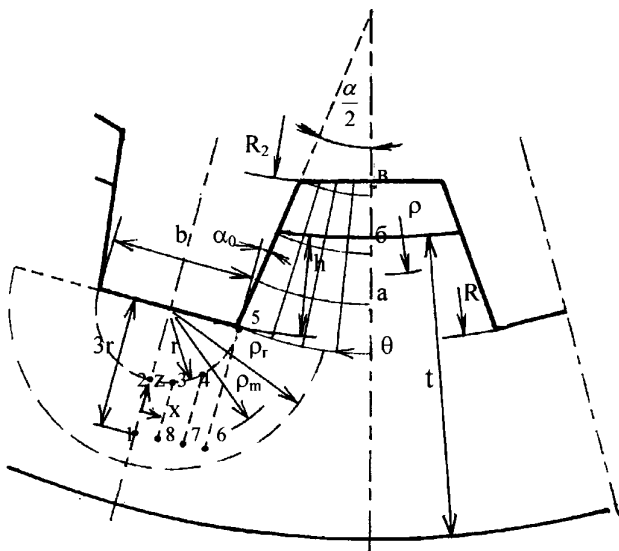


Рис. 7.9 – Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния при формировании внутреннего шлицевого профиля

Для областей, наиболее близких к разрушению, были построены пути деформирования характерных точек: 1–1; 2–2; 5–5; н–н (наростообразование) (рис. 7.10). В этом процессе области 2–2; 5–5 имеют сложные пути деформирования, поэтому нами применены критерии, основанные на нелинейной теории накопления повреждений, учитывающие историю деформирования в виде [36]:

$$\psi = \int_0^{e_i} n \frac{e_i^{n-1}}{e_p(\eta)^n} de_i = 1; \quad (7.2)$$

где $n = 1 + 0,2 \frac{d\eta}{de_i}$; $e_p(e_i)$ – значение диаграммы пластичности, соответствующее значению e_3 пути деформирования, а также критерий, учитывающий тензорный характер накопления повреждений [37]:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a \frac{e_i}{e_p(\eta)} \right) \beta_{ij} \frac{de_i}{e_p(\eta)}; \quad (7.3)$$

$$\psi_{ij} \psi_{ji} = 1, \quad (7.4)$$

где $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\epsilon_{ij}}{e_i}$ – направляющий тензор скоростей деформаций; $a = \text{const}$ –

некоторый подбирающийся коэффициент таким образом, чтобы удовлетворить условие (7.4), принимающееся как условие разрушения.

На рис. 7.11 представлены результаты расчета показателей напряженного состояния η и χ и использованного ресурса пластичности вдоль линии контакта шлица оправки и пластической области, а также расхождение результатов вычислений $\psi(\chi)$, $\psi(\eta)$, $\psi_{ij}(\chi)$, $\psi_{ij}(\eta)$.

Более широко эти исследования представлены в работах [30, 35, 36]. Из графических данных следует, что величины использованного ресурса пластичности, рассчитаны с учетом влияния $I_3(T_\sigma)$, оказались при разных значениях η выше значений ψ , рассчитанных без его учета. При этом величина расхождения зависит от показателей η и χ . С уменьшением η (ростом гидростатического давления) увеличивается влияние $I_3(T_\sigma)$ на величину предельной деформации. Следует отметить, что при определенных уровнях гидростатического давления, когда его значение по модулю приближается к пределу текучести материала на сдвиг, влияние $I_3(T_\sigma)$ уменьшается. Дальнейший рост давления приведет, вероятно, вновь к росту влияния $I_3(T_\sigma)$. На рис. 7.12 (см. цветн. вклейку) представлены плоскости деформирования и предельные поверхности пластичности для точек 2 и 5, указывающие на достаточный запас пластичности изделий.

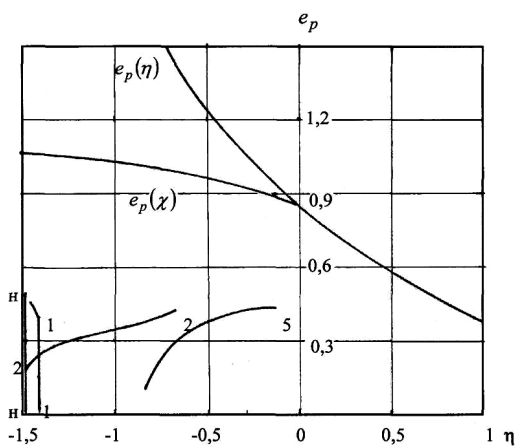


Рис. 7.10 - Диаграмма пластичности стали 20Х и пути деформирования опасных областей при вдавливании шлицевого штампа

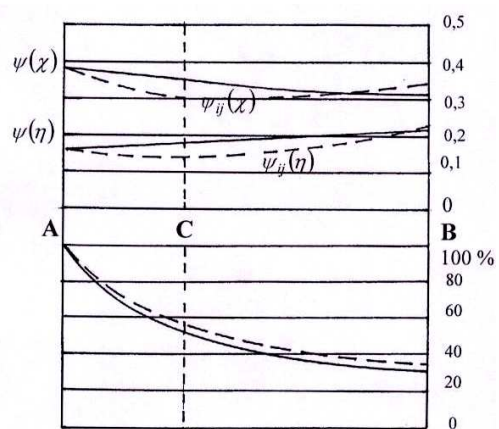


Рис. 7.11 – Расхождение результатов вычислений

$\psi(\chi)$, $\psi(\eta)$ – по критерию (7.2);

$\psi_{ij}(\chi)$, $\psi_{ij}(\eta)$ – по критерию (7.3)

Построенные плоскости деформирования и предельные поверхности пластичности показали на достаточный запас пластичности; обосновано, что при построении траектории нагрузки в пространстве безразмерных показателей η и χ ее вид однозначно определяется условиями формообразования, характерными для исследуемого процесса и практически не зависит от механических свойств деформирующегося металла; определены области деформирования, наиболее близкие к разрушению по показателям, учитывающим влияние первого и третьего инвариантов тензора напряжений (боковая область и область впадин профиля по отношению к процессу формирования внутреннего шлицевого профиля), в которых использованный ресурс пластичности достигает значений $\psi = 0,34 \dots 0,4$. С точки зрения обеспечения запаса прочности подобные расчеты необходимо проводить с учетом показателя, учитывающего влияние третьего инварианта тензора напряжений.

При исследовании процессов холодного пластического формообразования, сопровождающихся сложной немонотонной деформацией, необходимо применять модели, которые учитывают нелинейный характер накопления повреждений.

7.4. Интенсификация безводородного азотирования в тлеющем разряде холодным пластическим деформированием

С развитием современной техники возникают принципиально новые требования к работе узлов и деталей транспортных средств. Для их надежной и долговечной работы существует необходимость модифицировать поверхностный слой для улучшения триботехнических характеристик.

Вопросу модифицирования поверхностного слоя деталей транспортных средств методом ионного азотирования посвящены работы ведущих ученых: Лахтина Ю.М., Когана Я.Д., Каплуна В.Г., Арзамасова Б.Н., Суповой А.В. и др.

Для того, чтобы получить качественную поверхность деталей необходимо применять методы инженерии поверхности среди которых одним из наиболее эффективных является ионное азотирование. Это потому, что, в отличие от большинства термических и химико-термических методов (поверхностной закалки, цементации и т.п.), азотирование, как правило, является одной из заключительных (финишных) операций, используемых после термического улучшения (закалка с высоким отпускком) и цикла операций механической обработки.

Известно, что при ионном азотировании в тлеющем разряде, в отличие от процессов классического азотирования, замена водорода на аргонно-

азотную смесь позволяет избавиться так называемого водородного охрупчивания и, как следствие, ухудшения механических свойств сердцевины деталей. Высокое качество поверхностного слоя и основы в процессах ионного азотирования достигается за счет их выполнения при температурах, ниже температур высокого отпуска, что исключает деформации детали, а также за счет высокой энергии потока частиц, конденсирующихся на поверхности. Благодаря этому в микрообъемах поверхностного слоя создаются условия, обеспечивающие образование нитридов, а также упрочнения феррита или аустенита стали за счет растворения азота в последних [38].

Для реализации процесса азотирования используется метастабильный (положительный) участок вольтамперной характеристики, так называемая область сильнопоточного тлеющего разряда [39]. Процессы, протекающие на поверхности катода при образовании ионов газа можно разделить следующим образом: эмиссия электронов; вырывание атомов с поверхности (испарение); диффузия ионов в поверхностный слой детали; отдача кинетической энергии поверхности (нагрев детали). В нескольких миллиметрах от поверхности детали ионы, ускоренные в области падения катодного потенциала, с большой кинетической энергией попадают на поверхность детали. При этом до 90% энергии ионов превращается в тепловую энергию. Таким образом, плазма нагревает деталь до необходимой температуры азотирования. Значительно меньшая часть кинетической энергии ионов нужна для вырывания атомов из кристаллической решетки. Испарению могут подвергаться как металлические элементы, так и неметаллические, в частности углерод, кислород, азот и др. Формирование азотированного слоя происходит следующим образом: внедренные в поверхностный слой материала атомы азота диффундируют в дальнейшем как границами зерен, так и через зерна. В зависимости от продолжительности обработки и параметров процесса азотирования возникает соответствующий концентрационный профиль. При ионном азотировании в импульсном режиме диффузия азота происходит следующим образом: если на поверхности слоя концентрация азота достигает величины необходимой для образования γ' - или ϵ -нитрида тогда происходит образование именно этих нитридов. Они образуются их отдельных зародышей и образуют плотный слой, так называемый "слой соединений".

Толщина азотированного слоя независимо от содержания азота возрастает в результате проникновения азота в соответствии со вторым законом Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D \partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (7.5)$$

где D – коэффициент диффузии; C – концентрация азота.

Одновременно продолжается диффузия атомов азота через слой соединений в глубину металла. При этом скорость их диффузии через γ' -фазу примерно в 25 раз меньше, чем через феррит. Диффундирующий слой углерода при азотировании остается в слое соединений, где он поглощается образованными нитридами. Границы зерен, по которым размещены карбиды, в непосредственной близости от слоя соединений расширяются в результате поглощения азота.

Азот в плазме находится в атомарном состоянии, и в этой форме он химически активен. Перед поверхностью катода происходит образование насыщенных азотом нитридов железа. Молекулы FeN конденсируются на поверхности детали и диссоциируют, образуя нитриды железа более низкого порядка Fe_2N , Fe_3N , и Fe_4N . При этом выделяющийся азот диффундирует в деталь или, испаряясь, возвращается в плазму.

Однако, на сегодняшний день схемы улучшения процесса ионного азотирования в импульсном режиме почти исчерпаны. Очевидно, это потому, что уже почти исчерпаны возможности изменения состава газовой среды, давления, температуры, характеристик тлеющего разряда, алгоритма подготовки к азотированию и ведение собственно процесса, а также конструктивных параметров установки. Итак, главным недостатком процесса ионного азотирования остается его продолжительность.

Исходя из вышеизложенного нами предложена новая концепция ускорения процесса ионного азотирования за счет предварительной обработки деталей холодным пластическим деформированием. Известно, что ХПД сопровождается повышением дефектности кристаллического строения металла [40]. Вследствие деформации на 3-4 порядка повышается плотность дислокаций (с 10^6 – 10^9 см⁻² – перед деформацией до 10^{11} – 10^{12} см⁻² – после нее). При этом для обеспечения непрерывности деформации решетки в различных зернах стремятся изменить ориентацию таким образом, чтобы деформация облегчалась. Для этого плоскости легкого скольжения во всех зернах благоприятно переориентируются относительно внешнего усилия, то есть возникает текстура деформации. Следовательно, изменение комплекса физико-механических свойств металла под воздействием ХПД и, в первую очередь, возрастание на 3-5 порядков плотности дислокаций, а также формирование текстурности, которая вызывает анизотропию этих свойств, должно улучшить диффузные процессы при азотировании. Таким образом, если это предположение верно, то все известные процессы, в основе кото-

рых лежит ХПД: обкатка, раскатывание, деформирующее протягивание (дорнование), волочение, чеканка, обработка дробью и даже обработка резанием на определенных режимах, должны существенно сократить продолжительность ионного азотирования.

Для экспериментальной проверки этой гипотезы нами было проведено следующее исследование. Образцы низкоуглеродистой (25ХГТ) доевтектоидной стали обыкновенного качества с сортового проката (штабы) были подвержены полному отжигу при нагревании до температуры 950 °С, выдержке 30 мин и охлаждению вместе с печью. Это обеспечило однородность структуры, устранение остаточных напряжений, получение минимально возможных для данной стали показателей пластичности и наименьших значений твердости и прочности, а также плотности дислокаций $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-2}$. После очистки от окалины экспериментальные образцы подверглись ХПД по схеме линейного индентирования, то есть углубление штампа треугольного профиля с углом вершины $2\beta = 57^\circ$ в пластическое полупространство. Радиусом скругленного острозаточенного индентора ($\rho = 0,005-0,010 \text{ мм}$) из инструментальной стали (*HRC 64*) при этом пренебрегли, поскольку указанные значения скругления были на три порядка меньше величины углубления в другом инденторе ($h = 2-3 \text{ мм}$). ХПД выполнялось на модернизированном гидравлическом прессе усилием 200 кН (рис. 7.13, см. цветн. вклейку).

В результате индентирования в образце образовалась канавка треугольного профиля, вокруг которой металл получил деформационное упрочнение различной интенсивности. При этом в зоне контакта индентора с образцом в результате действия касательной силы сформировался тонкий текстурированный слой наиболее деформированного металла.

Следующая часть исследований была выполнена с помощью усовершенствованной установки для ионно-импульсного азотирования Института проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины (рис. 7.14, см. цветн. вклейку) и созданных нами модулей по исследованию азотированного слоя (рис. 7.15, см. цветн. вклейку).

Режимы ионного азотирования были следующими: температура – 530-550°С; давление – 87 Па; напряжение – 400 В; сила тока – 12 А; среда – смесь азота ($N_2 - 80\%$) и аргона ($Ar - 20\%$). Для обеспечения рабочей температуры, меньшей температуры высокого отпуска, была разработана схема питания, работающая в импульсном режиме с частотой 100 Гц. Для предотвращения превращения метастабильного тлеющего разряда в нежелательный стабильный дуговой разряд в установке для азотирования было пред-

ложено использовать быстродействующее реле, благодаря чему предотвращается повреждение поверхности упрочняемой детали [38].

После процесса ионного азотирования образцы исследовались методами микроскопического анализа, микротвердости и электронной микроскопии. Для микроскопического анализа оптический микроскоп МИМ-7 был оснащен WEB-камерой EWEL (2.1MPixels) и ПЭВМ, а электронный РЭМ-106И – ПЭВМ.

На рис. 7.16 в качестве примера представлены результаты исследования поверхностного слоя образца из стали 25ХГТ после ХПД с помощью линейного индентора и ионного азотирования длительностью 360 мин. Такое сочетание процессов позволило получить азотированный слой толщиной 0,4 мм, что в 2 раза превышает толщину азотированного слоя без предварительного деформационного упрочнения.

В результате проведенных опытов, а именно применения метода холодного пластического деформирования для ускорения процесса ионного азотирования, установлено, что при изготовлении, обновлении и повышении износостойкости ответственных деталей машин безводородного ионно-импульсного азотирования в пульсирующей плазме тлеющего разряда является одним из наиболее эффективных методов; холодное деформационное упрочнение, предшествующее ионному азотированию, позволяет ускорить процесс азотирования в 1,5-2 раза; наиболее распространенными деталями машин, при изготовлении и восстановлении которых следует модифицировать именно поверхностный слой, являются коленчатые и распределительные валы, клапаны, гильзы цилиндров, шестерни и другие детали средств транспорта.

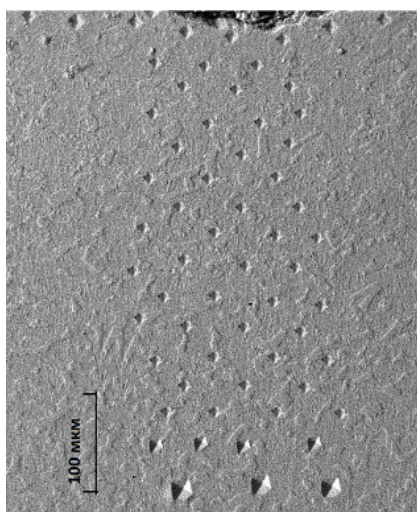


Рис. 7.16 – Микрофотография
поверхностного слоя образца из стали
25ХГТ после ХПД линейным
индентором и ионного азотирования,
исследованного методом
микротвердости

7.5. Холодная пластическая деформация как фактор повышения обрабатываемости пластических материалов

Проблема получения точных глубоких отверстий в деталях типа гильз является актуальной задачей механической обработки. Релаксация колебаний в соседних операциях действующих технологических процессов приводит к возникновению волнистости поверхности гильз гидроцилиндров. Это вызывает недопустимые перетекания и вытекания рабочей жидкости из гидросистем машин, которые сегодня работают с давлением порядка 15 МПа. Эти недостатки гидроцилиндров в ближайшее время будут расти вследствие перехода на более высокие значения давления. Кроме того, известные технологии не предусматривают улучшения свойств поверхностей отверстий, поверхностных слоев и сердцевины гильз гидроцилиндров методами инженерии поверхности. Существуют также проблемы обрабатываемости резанием высокопластичных конструкционных сталей, применяемых для изготовления гильз, а также повышения коэффициента использования материала трубной заготовки, который не превышает 0,7 – 0,75.

На рис. 7.17 показана построенная нами принципиальная схема процесса низкоскоростного свободного ортогонального резания, которая используется ниже для построения математической модели действия предыдущей холодной деформации на обрабатываемость пластических материалов. Для допустимого упрощения теоретического исследования в схеме предусмотрена одна плоскость простого смещения, характеризующаяся углом наклона последней (угол сдвига) β_1 по направлению резки v и средним касательным напряжением τ .

Известная никем до сих пор не опровергнутая принципиальная зависимость О.К. Зворыкина [41, 42], сочетающая явления в зоне стружкообразования через угол β_1 , контактные явления на передней поверхности через средний угол трения η и передний угол инструмента γ , полученный при заточке:

$$\beta_1 = \frac{\gamma}{2} - \frac{\eta}{2} + \frac{\pi}{4}. \quad (7.6)$$

В свою очередь, касательные напряжения τ связаны с микротвердостью обрабатываемого материала видоизмененной нами зависимости А.Н. Розенберга [41]:

$$\tau = 0,185 H_\mu. \quad (7.7)$$

Сказанное дает основания построить математическую модель действия предыдущей холодной деформации, которая будет выражаться по цепочке $H_\mu \rightarrow \tau \rightarrow \beta_1$, на обрабатываемость пластических материалов, следующим образом.

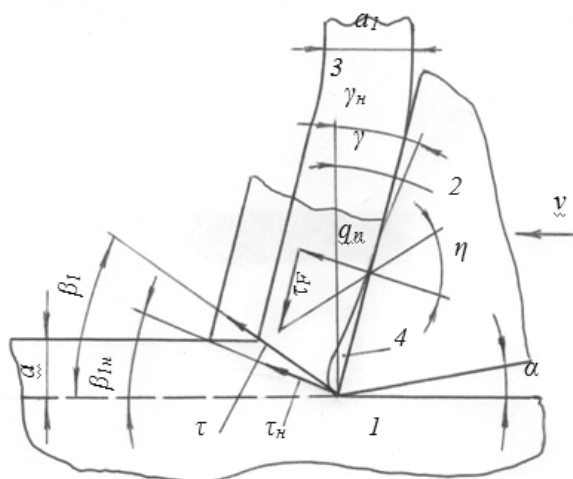


Рис. 7.17 – Схема процесса низкоскоростного свободного ортогонального резания:
 1 – обрабатываемый материал; 2 – режущий инструмент; 3 – стружка; 4 – нарост;
 γ – передний угол; γ_n – передний угол с учетом нароста; α – задний угол;
 η – средний угол трения на передней поверхности; β_I – угол наклона плоскости сдвига;
 β_{In} – угол наклона плоскости сдвига при работе с наростом; τ – среднее касательное
 напряжение в плоскости сдвига; τ_n – среднее касательное напряжение при работе с
 наростом; q_n – среднее контактное давление на передней поверхности; τ_F – удельная
 сила трения; a – допуск; a_I – толщина стружки.

Обрабатываемость, характеризующаяся углом сдвига β_I , зависит от трех переменных – касательных напряжений τ , переднего угла инструмента γ , и среднего угла трения η . Кроме того, передний угол заточки γ_3 выбирается таким образом, чтобы обеспечивать оптимальную устойчивость инструмента T_o .

Средний коэффициент трения μ на передней поверхности режущего клина – это определенная усредненная характеристика напряженного состояния в контактной области [42]. Поскольку при расчете среднего коэффициента трения в расчет берется вся контактная поверхностная площадка, а напряженное состояние в зоне контакта и зоне стружкообразования является единственным, то средний коэффициент трения является некоторой обобщенной характеристикой напряженного состояния при стружкообразовании и представляет собой отношение двух независимых друг относительно друга величин: удельной силы трения τ_F и среднего контактного давления q_n [43]:

$$\mu = \tau_F / q_n = \operatorname{tg} \eta. \quad (7.8)$$

Коэффициенты в формуле (7.9) являются функциями-полиномами. Принято, что зависимость вероятности обрабатываемости сталей от предыдущей холодной деформации носит экспоненциальный характер. Таким образом:

$$\begin{cases} \beta_1 = a_0[f(\tau)] + a_1[f(\tau)]\gamma + a_2[f(\tau)]\eta + \dots + a_n[f(\tau)]\gamma^n\eta^n \\ a_n = b_{0n} + b_{1n}\tau + \dots + b_{kn}\tau^k \\ \gamma_3 = \frac{\ln T_0}{\beta_1} \end{cases}, \quad (7.9)$$

где a_n , b_n – коэффициенты уравнений аппроксимации; n , k – порядки уравнений аппроксимации; γ_3 – передний угол инструмента полученный заточкой; η – средний угол трения на передней поверхности; T_0 – оптимальная устойчивость инструмента.

Степени полиномиальных уравнений и значения коэффициентов определяются путем обработки экспериментальных данных, которые приведены на рис. 7.18–7.19.

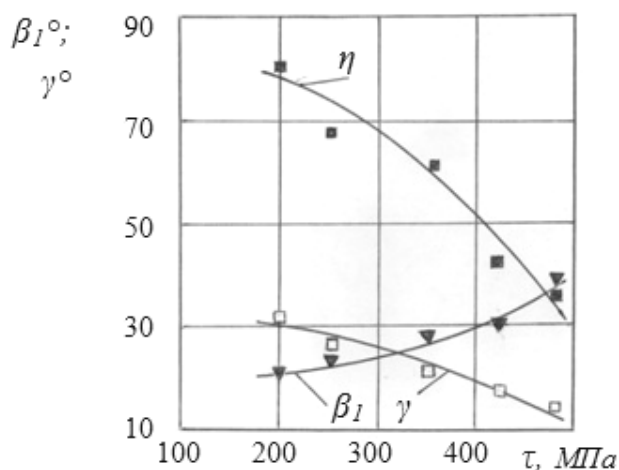


Рис. 7.18 – Зависимости среднего угла трения η , переднего угла γ и угла сдвига β_1 от касательного напряжения τ

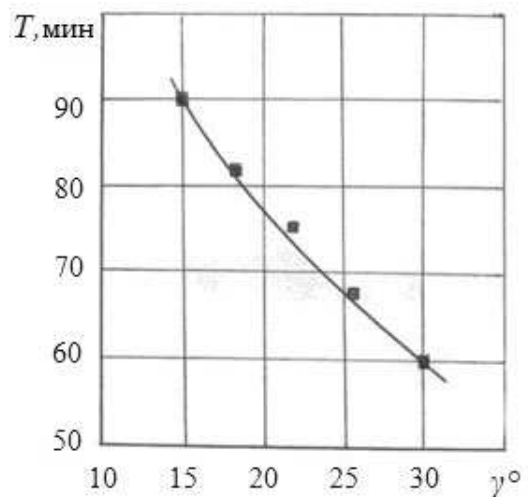


Рис. 7.19 – Зависимость стойкости инструмента от действительного переднего угла γ

Такие данные, касающиеся стали 10, приведены на рис. 7.18, 7.19. Их обработка выполнялась по известной схеме, вот почему детали последней здесь не приводятся, а лишь описываются фрагментарно.

Таким образом, сначала определялась начальная точка и интервалы варьирования факторов τ , γ , η . Затем с помощью плана Бокса-Бенкина [44] описывались поверхности отклика. Этот план воспроизводил не полную квадратическую функцию отклика. Далее составлялась матрица планирования и проводились эксперименты, которые проверялись по критерию Кохрена [45]. Затем для каждого контролируемого параметра получали коэффициенты полинома, определялась адекватность подобранной функцио-

нальной зависимости, определялась значимость коэффициентов полиномов, причем не значимые коэффициенты отвергались. Определялись коэффициенты уравнений аппроксимации для всех трех названных выше факторов.

Для определения адекватности полученных уравнений проводился регрессионный анализ по критерию Фишера. В результате проверки значимости коэффициентов регрессии на основе подхода Паре [46] были определены значимые коэффициенты для уравнения (7.9). В результате вычислительной процедуры получили оптимальные значения определяемых факторов. Таким образом определяемый вектор будет следующим:

$$\begin{bmatrix} \tau = 470 - 500МПП (H_{\mu} = 2,54 - 2,70 ГПа) \\ \gamma = 14 - 16^{\circ} \\ \eta = 35 - 38^{\circ} \end{bmatrix}. \quad (7.10)$$

Что касается деформирующего протягивания (ДП), то этот процесс нас интересует с двух позиций. С одной стороны, эта технологическая операция при ее проведении на трубчатых деталях конечной толщины со значительными деформациями упрочняет насквозь стенку изделия. Это происходит потому, что деталь получает сквозную деформацию растяжения. Кроме этой обязательной деформации, поверхностный слой изделия на глубину до нескольких десятых долей миллиметра подвергается деформации сдвига, вызванной взаимодействием деформирующих элементов (ДЭ), которые передвигаются по обработанной поверхности (ОП) в режиме скольжения, с последней. Таким образом, ДП является мощным средством холодного деформационного упрочнения (ХДУ) детали можно использовать для обработки резанием при протягивании. С другой стороны, ДП является источником волны внеконтактной деформации (ВВД), которая сопровождает каждый ДЭ в динамике. Это, безусловно, также влияет на зуб режущей части протяжки, если его разместить в пределах действия или вблизи ВВД.

На рис. 7.20 представлены результаты экспериментов по изучению упрочнения поверхности и сердцевины трубчатых деталей, изготовленных из стали 10 и стали 35. В последнем случае были использованы образцы части гильз гидроцилиндров, изготавливаемых в производстве. Отношение толщины t_0 стенки к диаметру d_0 составило $t_0/d_0 = 0,15$.

Из представленных на рис. 7.20 данных вытекает следующее. Деформирующее протягивание упрочняет сердцевину детали из стали 10 на 45% (начальная твердость $H_{\mu} = 1,1$ ГПа) и стали 35 – на 30% (начальная твердость $H_{\mu} = 1,9$ ГПа).

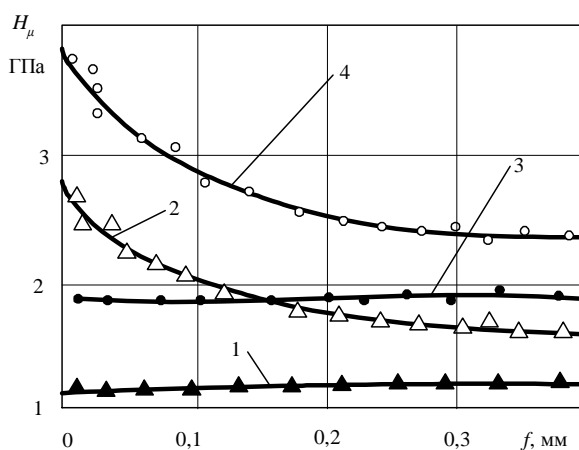


Рис. 7.20 – Зависимость микротвердости H_μ от толщины t стенки трубчатой детали при протягивании стали 10 (7.7) и стали 35 (7.9):
 $v = 0,15$ м/с; $a = 0,15$ мм;
 деформирующий элемент – твердый сплав ВК15М с заборным конусом $\alpha_3 = 4^\circ$; МОР – сульфозреол.
 Кривые 1 и 3 – стали 10 и 35 соответственно в неупрочненном состоянии

Толщина поверхностного слоя, упрочненного дополнительной деформацией сдвига, во всех случаях достигает 0,2 мм. В этом слое возникает текстура, особенно в деталях из сталей, где доминирует ферритная составляющая. Микротвердость поверхности отверстий после ДП сталей 10 10ГН, 20Г и 35 увеличивалась соответственно на 130; 115; 99 и 90%. В первом и последнем случаях в соответствии с $H_\mu = 2,8$ ГПа и $H_\mu = 3,85$ ГПа.

Анализ многочисленного исследования кривых " $H_\mu - t$ " типа приведенных на рис 7.20 показал, что эти кривые хорошо аппроксимируются нормальным уравнениями прямой (рис. 7.21):

$$x \cos \psi + y \sin \psi - p = 0, \quad (7.11)$$

где x, y – координаты точки на прямой; p – длина перпендикуляра, опущенного на начало координат на прямую ($p > 0$); ψ – угол наклона прямой [47].

Для наших условий: $p - H_\mu$; $\psi = \pi/2$ для начальной микротвердости заготовки (прямая 1); $\psi = 70 - 75^\circ$ для участка, характеризующего сквозное упрочнение заготовки растяжением (прямая 2); $\psi = 55 - 60^\circ$ для участка, где происходит дополнительная деформация сдвига (прямая 3); M – точка, определяющая границу между последними двумя участками. Во всех случаях координата x для точки M равна 0,2 мм.

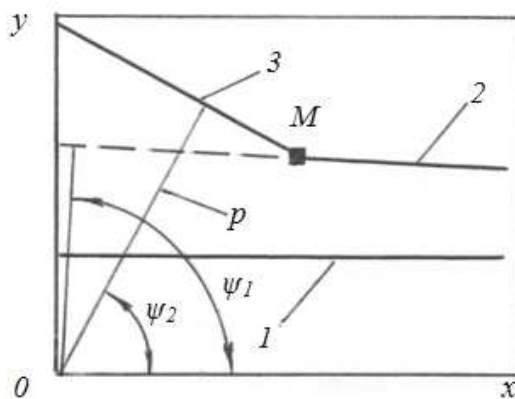


Рис. 7.21 – Схема аппроксимации кривых, представленных на рис. 7.20

Таким образом, ДП с одним деформирующим элементом, работающим с натягом на сторону 0,15 мм, можно эффективно использовать для ХДУ ОМ перед секцией с 2 – 3 зубцов.

Еще одним фактором, характеризующим ДП, является волна неконтактной деформации, сопровождающая каждый ДЭ при обработке деталей с конечной толщиной стенки (рис. 7.22). А именно такими являются полые трубчатые детали типа гильз гидроцилиндров с глубокими отверстиями. Для этих изделий характерно отношение толщины t_0 стенки заготовки к диаметру d_0 отверстия $t_0/d_0 = 0,1-0,15$. Примерно это соотношение наблюдается и для готовой детали, если основным процессом обработки отверстия является протягивание. Расстояние от большего основания рабочего конуса ДЭ до максимума ВВД принято обозначать l_2 , а всю длину последней обозначать l_1 . В работе [48] принято считать, что $l_1 \approx 3l_2$. Высоту ВВД для рассматриваемого нами ряда сталей и сечений деталей можно считать $h_3 = 0,15-0,25$ мм, а усадку отверстия после прохождения ДЭ – $U_\delta = 0,015-0,025$ мм.

Результаты исследований служат исходными данными для разработки комбинированных деформирующе-режущих протяжек [49] и процесса обработки отверстий гильз гидроцилиндров по схеме «комбинированное протягивания - раскатка». Этими исходными данными являются: чертеж детали, информация о заготовку и обрабатываемый материал, а также тип производства. Толщина дефектного слоя на трубной заготовке может достигать величины 0,5 мм.

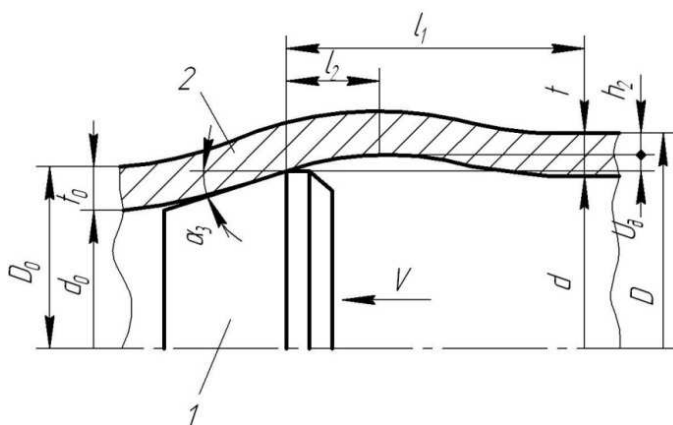


Рис. 7.22 – Схема контактной зоны при ДП полых трубчатых деталей 2 с конечной толщиной стенки деформирующим элементом 1: v – скорость протягивания; D_0 и D – соответственно внешние диаметры заготовки и детали после обработки; d_0 и d – соответственно диаметры отверстия заготовки и детали; t_0 и t – соответственно толщины стенки заготовки и детали; $2\alpha_z$ – угол заборного конуса ДЭ. Параметры ВВД: l_1 – длина; h_2 – высота; l_2 – расстояние от начала до максимума волны; U_δ – упругая усадка отверстия.

Производственные исследования нового технологического процесса, построенного по схеме обработки отверстия гильзы «комбинированное протягива-

ние – раскатка» и основанного на использовании инструмента новой конструкции, показали на трех машиностроительных предприятиях эффективность предложенной технологии в первую очередь за счет повышения коэффициента использования материала до 0,85 – 0,90. Использование техники, оснащенной опытными образцами гидроцилиндров с гильзами нового образца (рис. 7.23, см. цветн. вклейку), показало надежность этих гидроцилиндров.

Таким образом, разработана математическая модель действия предыдущей холодной деформации на обрабатываемость пластических материалов.

Показано, что деформирующее протягивание упрочняет раздачей сердцевину трубчатых деталей из сталей 10, 10ГН, 20Г и 35 на 30 - 45%. При этом толщина поверхностного слоя этих деталей, упрочненного дополнительной деформацией сдвига, достигает 0,2 мм, а микротвердость поверхности увеличивается в 1,9 – 2,3 раза. Высота ВВД находится в пределах 0,15 – 0,25 мм, а усадка отверстия – 0,015 – 0,025 мм. Это позволяет построить элементарные секции протяженного инструмента в виде «деформирующее кольцо с натягом 0,15 мм – 2-3 режущие зубцы».

Разработаны рекомендации по проектированию и новую конструкцию комбинированного деформирующе-режущего инструмента для обработки глубоких отверстий, который отличается тем, что переднее деформирующее кольцо является правящим, второе деформирующее кольцо криволинейного профиля выполняет основную работу пластической деформации, а следующие секции состоят из деформирующего кольца и 2–3 зубцов. Инструмент оснащен демпфирующими дистанционными втулками. Разработана программа расчета нового инструмента. Производственные исследования процесса, построенного по схеме обработки отверстия гильзы «комбинированная протяжка – раскатка» показали на трех машиностроительных предприятиях эффективность новой технологии за счет повышения КИМ до 0,85 – 0,90. Экономический эффект от внедрения малозатратного процесса изготовления корпуса (гильзы) гидроцилиндра Ц-100 составляет 26980 грн. на 1000 деталей.

7.6. К расчету инструмента для обработки отверстий гильз гидроцилиндров гидросхем современных машин

Наши исследования [50–53] показали, что ресурсосберегающий процесс обработки глубоких отверстий в гильзах гидроцилиндров, изготавливаемых из трубного проката, целесообразно строить по схеме «комбинированное протягивание – раскатка роликовым инструментом». Однако, при разработке протяжного инструмента нужно решить несколько еще недостаточно исследованных проблем, связанных в конечном счете с надежностью

изделия, в частности: снижение негативного влияния на прямолинейность отверстия «пластического шарнира», повышение прочности и стойкости рабочих элементов протяжек, уменьшение уровня вибраций инструмента при обработке гильзы, повышение радиальной жесткости последней технологическими методами, а также разработку программы расчета комбинированного инструмента.

Деформирующе–режущее протягивание – один из наиболее эффективных технологических процессов обработки отверстий, в частности глубоких. Отличительными особенностями этого процесса являются низкие скорости обработки (до 10 м/мин), высокая производительность, обуславливаемая одновременным участием в работе порядка 5 – 15 деформирующих элементов и зубьев с общей длиной их контакта с изделием до 3000 мм, что на четыре порядка выше такого контакта при точении, а также использование сложного дорогостоящего инструмента из современных инструментальных материалов. Последнее обстоятельство требует дополнительного углубленного исследования износа, стойкости и прочности деформирующе–режущих протяжек, поскольку в известных работах принимался ряд допущений, искажавших общую картину этих явлений.

При низких и средних скоростях резания, когда диффузионные процессы вследствие невысоких температур в зоне контакта (до 500 °С) маловероятны, причиной изнашивания передней и задней поверхностей инструмента являются интегрально протекающие процессы абразивного, адгезионного и адгезионно–усталостного видов износа. Наши исследования показали, что это справедливо как для зубьев, так и для деформирующих элементов (ДЭ), изготовленных из широкого спектра инструментальных материалов, в частности, твердого сплава марки ВК15 и быстрорежущих или легированных сталей марок Р6М5 и ХВГ, как типичных при изготовлении комбинированных протяжек. Интенсивность названных видов механического износа зависит от контактного давления. Процесс внедрения абразивной частички обрабатываемого материала или технологической среды карбидного, оксидного, нитридного или другого подобного происхождения в инструментальный материал с последующим перемещением («царапанием») стабильно протекает в том случае, когда величина нормальных напряжений (контактного давления) примерно втрое превышает предел текучести σ_T материала, на который наносится царапина. Работа единичной абразивной частицы может быть смоделирована коническим индентированием, при котором при угле конуса $2\beta = 170^\circ$ указанное превышение, обуславливаю-

щее начало внедрения, равно $A_k = 2,77$ [52]. Приняв во внимание сказанное, получим значение силы P , как равнодействующей проекции нормальных напряжений в момент завершения внедрения абразивной частички в инструментальный материал на единичную площадку S :

$$P = A_k \cdot \sigma_T \cdot S \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (7.12)$$

На адгезионную составляющую изнашивания также оказывают сильное влияние нормальные напряжения. Однако механизм износа здесь определяют мостики схватывания, которые возникают при сближении контактирующей пары, когда давление превысит предел упругости одного или обоих материалов. Это содействует началу пластической деформации, приводящей к возрастанию площади мостика схватывания, повышению его несущей способности и, следовательно, к возрастанию интенсивности адгезионного износа. Визуально или при небольшом увеличении этот вид износа хорошо идентифицируется, поскольку при его протекании весьма велика интенсивность возникновения и разрушения мостиков схватывания. На изношенных площадках зубьев хорошо видны «оспинки» адгезии, которые отчетливо отличаются от абразивных «бороздок». Известно [55], что на один метр пути резания каждая точка контакта подвергается тысячекратному воздействию срезающих напряжений. Такое воздействие приводит к усталости локальных объемов инструментального материала и их последующему разрушению, т.е. возникает третья составляющая механического износа при комбинированном протягивании – адгезионно–усталостная.

Таким образом, контактное давление является главным фактором, определяющим интенсивность изнашивания протяжного инструмента, причем, чем это давление выше, тем ниже будет стойкость последнего. Однако, изучение топографии площадок изношенных ДЭ и зубьев приводит к выводу, что, поскольку интенсивность износа различна по площади контакта, то и контактные давления были неравномерными по этой площади. Наши исследования показали, что эпюра нормальных напряжений на передней поверхности режущей части и рабочего конуса деформирующей части является высокоградиентной, т.е. значение контактного давления могут отличаться вдоль эпюры в 2–10 раз и достигать значения 4 ГПа. Этим и объясняется различная степень изнашивания вдоль площади контакта, которая после определенного времени работы протяжки приобретает форму поверхности, описываемой плоскими кривыми второго порядка типа спирали, конхоиды, эвольвенты, циклоиды. Отсюда вытекает логический вывод о придании, с целью снижения градиента эпюры контактного давления и, как следствие, повышения износостойкости

инструмента, его рабочим поверхностям такой криволинейной формы, которую имеет эпюра давлений при плоской рабочей поверхности [56].

Для ДЭ авторами была проведена специальная часть исследования, в процессе которого было установлено следующее. Изучение топографии износа ДЭ после 5–10 тысяч метров пути протягивания и специфики разрушения от напряжений изгиба свидетельствуют о сложном характере эпюры распределения контактных давлений даже в тяжелых условиях обработки. Так, поперечное сечение, по которому происходит разрушение ДЭ, как правило, проходит через поверхность рабочего конуса вблизи границы с цилиндрической ленточкой. Там же находится и место («поясок») наибольшего износа после продолжительной работы инструмента. Другой такой «поясок» размещен вблизи начала поверхности контакта. Разработанная нами методика определения нормальных контактных давлений [57] позволила определить характер их распределения в зависимости от условий протягивания. Эксперименты были проведены на втулках из стали 20 и 20Г, а также из алюминиевого сплава АК6 с исходным диаметром отверстия $d_0 = 45$ мм и толщиной стенки $t_0 = 2–10$ мм при натяге $a = 0,4–1,6$ мм и скорости протягивания $v = 3$ м/мин. Для обеспечения минимальной (критической) длины контакта соблюдалось условие:

$$t_{0_{кр}} = 17,0 \cdot a^{0,77} \cdot d^{-0,242}. \quad (7.13)$$

На рис. 7.24 приведен пример распределения нормальных давлений по длине контакта для стали 20Г.

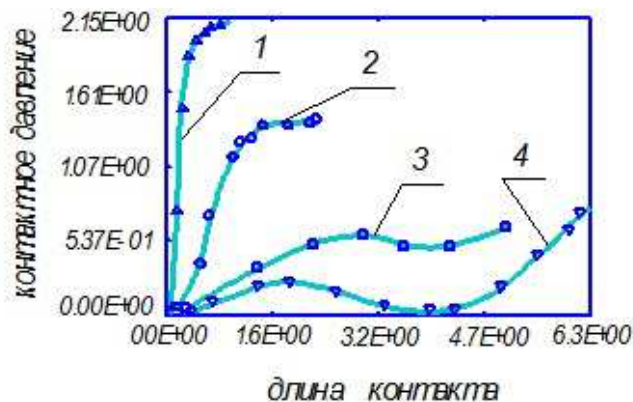


Рис. 7.24 – Распределение нормальных давлений по длине контакта ДЭ с деталью из стали 20Г при протягивании втулки с диаметром отверстия 45 мм: 1 – $a = 0,4$ мм; $t_0 = 6$ мм; 2 – $a = 1$ мм; $t_0 = 6$ мм; 3 – $a = 1,6$ мм; $t_0 = 6$ мм; 4 – $a = 1,6$ мм; $t_0 = 4$ мм.

В результате их обработки были получены полиномы 5–ой степени вида:

$$g / g_{\max} = \sum_{i=1}^5 B(i) \left(\frac{l}{l_{\phi}} \right)^i, \quad (7.14)$$

где: g_{\max} – максимальная величина нормальных контактных давлений для данной

эпюры; l – расстояние от начала контакта до точки, где определяется g/g_{\max} ; l_{ϕ} – фактическая длина контакта; $B(i)$ – коэффициент регрессии при $\left(\frac{l}{l_{\phi}}\right)^i$.

Коэффициенты $B(i)$, значимость которых оценивалась по t – критерию Стьюдента, определяются по зависимостям:

$$B(1) = -2,894 \ln \left(2,239 / \left(1 + \frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right) \right); \quad (7.15)$$

$$B(2) = 41,68 - \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{3,2}}{1,588 \cdot 10^{-3} + 2,783 \cdot 10^{-2} \left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{3,55}}; \quad (7.16)$$

$$B(3) = \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{3,57}}{4,187 \cdot 10^{-4} + 6,113 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^4}; \quad (7.17)$$

$$B(4) = 212,2 - \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{3,8}}{2,361 \cdot 10^{-4} + 4,475 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{4,2}}; \quad (7.18)$$

$$B(5) = \frac{\left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{3,71}}{7,174 \cdot 10^{-4} + 9,899 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_0}{t_{0_{kp}}} \right)^{4,12}}. \quad (7.19)$$

Для определения максимального контактного давления для зависимости (7.14) следует воспользоваться уравнением [58]:

$$g_{\max} = P_k / \left\{ 2 \cos \alpha_{\phi} l_{\phi} \pi \left[\left(R_{\phi} - \sin \alpha_{\phi} l_{\phi} \right) \sum_{i=1}^5 \frac{B(i)}{i+1} + l_{\phi} \sin \alpha_{\phi} \sum_{i=1}^5 \frac{B(i)}{i+2} \right] \right\}. \quad (7.20)$$

Значение радиальной силы P_k для зависимости (7.20) вычисляется по уравнениям, приведенным в работе [59].

На рис.7.25 приведены типичные по характеру эпюры распределения нормальных контактных давлений для различных толщин стенок, натягов и обрабатываемых материалов. Эти данные, а также кривые, приведенные на рис. 7.24, свидетельствуют о том, что характер эпюр обуславливается натягом и толщиной стенки детали. На величину нормальных давлений, наряду с этими факторами, влияют свойства обрабатываемого материала. При малых натягах и больших толщинах стенки эпюра близка к прямоугольнику (рис.7.25, кривая 1). В этом случае в расчетах инструмента рабочую нагрузку допустимо принимать равномерно распределенной по длине контакта. Увеличение натяга при больших толщинах стенки приводит к приобретению эпюрой вида криволинейного треугольника (кривые 2 и 3), а уменьшение толщины стенки при больших натягах превращает эпюру в два криволинейных треугольника (кривая 4). В последнем случае кривая нормальных давлений имеет два максимума, первый из которых находится вблизи начала контакта, а другой – в точке перехода поверхности рабочего конуса в цилиндрическую ленточку. Минимум кривой находится примерно посередине длины контакта.

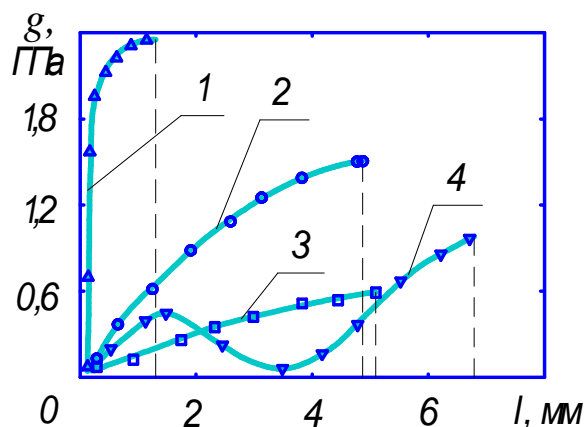


Рис. 7.25 – Распределение нормальных давлений g по длине контакта l_ϕ ДЭ с деталью (диаметр отверстия 45 мм) при протягивании:
1 – сталь 20; $a = 0,4$ мм; $t_0 = 10$ мм;
2 – сталь 20; $a = 1,6$ мм; $t_0 = 10$ мм;
3 – сплав АК6; $a = 0,4$ мм; $t_0 = 6$ мм;
4 – сталь 20Г; $a = 1,6$ мм; $t_0 = 4$ мм.

Значительно понизить градиент эпюры контактных давлений также можно, используя наростообразование [50, 60]. Нами установлено, что тело нароста при протягивании имеет практически стабильные формы и объём, подвергается лишь действию упругих деформаций и фактически является дополнительным режущим клином с собственными геометрическими параметрами, которые существенно отличаются от геометрических параметров инструмента, полученных при заточке. Нарост генерируется системой «инструмент–деталь» при адаптации последней к заданным условиям резания. Изучение многочисленных микрофотографий «корней» стружки показало, что внешняя граница тела нароста, контактирующая со

стружкой, имеет форму плоской кривой типа конхоиды, спирали, эвольвенты, циклоиды. Это значительно выпрямляет эпюру контактных давлений и, как следствие, позволяет повысить износостойкость инструмента.

Таким образом, износостойкость протяжного инструмента в значительной степени определяется контактным давлением. Существенно повысить её можно средствами спрямления эпюры этих давлений путем придания рабочей поверхности ДЭ и режущего клина формы кривой эпюры давлений или используя наростообразование.

Литература к разделу 7

1. Канарчук В.Є. Поліпшення експлуатаційних показників машин технологічними методами, побудованими на холодному пластичному деформуванні / В.Є. Канарчук, М.М. Дмитрієв, Е.К. Посвятенко // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. – К.: НТУ. – 2000. – Вип. 9. – С. 6–16.

2. Посвятенко Е.К. Комбіновані методи інженерії поверхні деталей транспортних засобів / Е.К. Посвятенко, О.В. Мельник, В.В. Алексєєв // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ. – 2006. – Вип. 11. – С. 13–16.

3. Посвятенко Е.К. Холодне пластичне деформування як засіб інтенсифікації безводневого азотування деталей засобів транспорту / Е.К. Посвятенко, В.В. Алексєєв // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ. – 2011. – Вип. 23. – С. 44–47.

4. Огородников В.А. Приложение теории деформируемости к решению задач механики деформирования внутреннего шлицевого профиля обжатием на оправке / В.А. Огородников, О.В. Нахайчук, В.И. Музычук // Сборник научных трудов международной науч.-техн. конф. “Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно-штамповочного производства”. – М.: МГТУ “МАМИ”. – 2003. – С. 66–75.

5. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородніков та ін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.

6. Розенберг О.А. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования / О.А. Розенберг, В.В. Мельниченко, С.Ф. Студенец // Изв. АИН Украины: Спец. выпуск отд. “Тяжёлое и транспортное машиностроение”. – 1998. – С. 96–102.

7. Огородников В.А. Исследование процесса закатки поршня с шатуном аксиально-роторного поршневого насоса / В.А. Огородников,

О.В. Нахайчук, В.И. Музычук // Проблемы трибологии. – 2005. – №1(34). – С. 129–133.

8. Використаний ресурс пластичності металу при видавлюванні внутрішньої метричної різи / Огородніков В.А., Нахайчук О.В., Любін М.В., Бабак М.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. – №1 (18). – С. 68–72.

9. Огородников В.А. Комплексное исследование механики формообразования крутоизогнутых отводов / В.А. Огородников, О.В. Нахайчук, О.В. Грушко // Проблемы трибологии. – 2000. – №4. – С. 77–84.

10. Нахайчук О.В. Напряжённо-деформированное состояние при вдавливании в пластичный материал инденторов различных форм // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск: ДГМА. – 2000. – С. 41–47.

11. Нахайчук О.В. Розвиток процесів холодного об'ємного штампування заготовок складного профілю на основі оцінки їх якості в умовах граничного формоутворення: Автореф. дис. ...д-ра. техн. наук: 05.03.05 / ДДМА. – Краматорськ, 2006. – 35 с.

12. Огородніков В.А. Вплив термообробки на відновлення запасу пластичності виробу під час формування внутрішнього шліцевого профілю / В.А. Огородников, О.В. Нахайчук, В.И. Музычук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – №5. – С. 92–95.

13. Нахайчук О.В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДГМА. – 2005. – С. 119–123.

14. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.

15. Хван Д.В. Исследование эффекта Баушингера при линейном напряжённом состоянии / Д.В. Хван, В.Б. Бочаров // Проблемы прочности. – 1989. – №7. – С. 112–114.

16. Огородников В.А. Механика немонотонного пластического деформирования / В.А. Огородников, Н.В. Бабак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – С. 255–259.

17. Огородников В.А. О влиянии третьего инварианта тензора напряжений на деформируемость в процессах объёмного формообразования / В.А. Огородников, О.В. Нахайчук // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: Сб. тез. междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург: БГТУ “Военмех”, 2005. – С. 66–75.

18. Михалевич В.М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ - Вінниця”, 1998. – 195 с.
19. Посвятенко Е.К. Наукове обґрунтування ефективності процесу деформуюче-ріжучого протягування. Автореф. дис...д-ра техн. наук. 05.03.01. – К., 1993. – 35 с.
20. Лунгол И.В. Повышение эффективности деформирующе-режущего инструмента при протягивании глубоких отверстий. Автореф. дис...канд. техн. наук. 05.03.01. – Киев, 1988. – 16 с.
21. Нахайчук О.В. Підвищення ефективності одержання технологічних канавок на поверхнях отворів холодним пластичним деформуванням. Автореф. дис...канд. техн. наук. 05.03.05. – Вінниця, 1994. – 17 с.
22. Посвятенко Е.К., Паладійчук Ю.Б. Формування регулярного макрорельєфу поверхонь отворів деталей комбінованим протягуванням // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Машинобудування. – 1999. – Вип.37. – С.256–261.
23. Посвятенко Э.К., Крицкий А.Д., Маслов Р.О. Малоотходная технология изготовления поршневых пальцев ДВС на основе редуцирования трубных заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №7. – С.8–9.
24. Посвятенко Е.К., Алексеев В.В., Нахайчук О.В. Розрахунок оптичного інструменту для отримання технологічного макрорельєфу на отворах гільз // Автошляховик України. – 2005. – № 8. – С.65–67.
25. Посвятенко Е.К., Мельник О.В., Алексеев В.В. Комбіновані методи інженерії поверхні деталей транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ. – 2006. – Вип. 11. – С. 13–16.
26. Розенберг О.А., Огородников В.А., Нахайчук О.В. Механика формирования внутреннего шлицевого профиля методом обжатия на оправке // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. пр. – Київ: НАН України, ІНМ ім. В. М. Бакуля. – 2003. – С. 256–266.
27. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: Монографія. / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородніков, та інш. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 158 с.
28. Розенберг О.А., Мельниченко В.В., Студенец С.Ф. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования // Известия АИН Украины. Специальный выпуск отделения тяжёлого и транспортного машиностроения. – 1998. – С. 96–102.
29. Посвятенко Э.К. Деформирующее протягивание точных тонко-

стенных деталей с ограничением укорочения // Физические явления при деформирующем протягивании и резании пластичных металлов. – Киев: ИСМ АНУКrainи, 1978. – С.87–93.

30. Нахайчук О.В., Посвятенко Е.К. Розвиток принципів та методів дослідження процесів холодного пластичного деформування // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ. – 2012. – Вип. 9. – С. 51–57.

31. Огородников В.А., Исследование процессов сложного деформирования в малоотходной технологии объёмной штамповки / В.А. Огородников, И.О. Сивак // Тр. Республ. НТК – Кишинёв, 1982. – С. 122–123.

32. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

33. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников. – К.: УМК 130, 1989. – 152 с.

34. Огородніков В.А., Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Монографія / В.А. Огородніков, В.І. Музичук, О.В. Нахайчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – 179 с.

35. Посвятенко Е.К. Застосування ХПД в процесах зі складним навантаженням та немонотонним деформуванням / Е.К. Посвятенко, О.В. Нахайчук // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 25. – С. 39–43.

36. Дель Г.Д., Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г.Д. Дель, В.А. Огородников, В.Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 135–140.

37. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла / Г.Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.

38. Посвятенко Е.К. Відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання іонно-імпульсним азотуванням / Е.К.Посвятенко, В.В.Алексєєв, А.В.Рутковський // Вісн. Сумськ. держ. ун-ту: Серія технічні науки (машинобудування).– Суми, 2005.– №11.– с.119–122

39. Азотирование и карбонитрирование / Р.Чаттерджи–Фишер, Ф.–В.Эйзел, Р.Хоффман и др. Пер. с нем.; Под ред. А.В.Супова.– М.Металлургия, 1990.–280с.

40. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник / С.С.Дяченко.– Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003.–226с.

41. Розенберг А. М. Элементы теории процесса резания металлов / А. М. Розенберг, А. Н. Ерёмин. – М. – Свердловск : Машгиз, 1956. – 320 с.

42. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 414 с.

43. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М. Ф. Полетика. – М. : Машиностроение, 1969. – 148 с.
44. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
45. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 388 с.
46. Гончаров В.Г. Математическое планирование оптимизации коэффициента трения при дискретном упрочнении элементов трибосистем / В.Г. Гончаров // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – Вып. 30. – С.36–39.
47. Справочник машиностроителя: в 6 т. / Ф.М. Диментберг [и др.] под ред Н.С. Ачеркана. – М.: Машгиз, 1963. – Т.1. – 592 с.
48. Посвятенко Е. К. Визначення параметрів стружкороздільної канавки при деформуючому протягуванні / Е. К. Посвятенко, Ю. Б. Паладійчук // Вибрації в техніці і технологіях. – 1998. – № 2. – С. 57–59.
49. Патент на винахід 89326 Україна, МПК (2014.01) B23P 15/00. Комбінована деформуючо–різальна протяжка / Посвятенко Е.К., Паладійчук Ю.Б., Посвятенко Н.І., Будяк Р.В.; власник Вінницький національний аграрний університет; – № u 2013 14974; заявл. 20.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
50. Посвятенко Е.К. Дослідження процесу обробки гільз циліндрів гідросистем машин/ Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк // Вісник Національного транспортного університету. – К., 2009. – Вип. 19. – Ч.1. – С. 49–53.
51. Посвятенко Е.К. Основні напрямки синтезу ресурсозберігаючих процесів виготовлення гідроциліндрів машин/ Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. Нац. техн. ун-ту «ХП». – Х., 2009. – Вип.2 (19). – С.128–134.
52. ХДЗ (Холодне деформаційне зміцнення) як пріоритет підвищення надійності гідроциліндрів для комунальної техніки / Р.В. Будяк, Ю.Б. Паладійчук, В.Г. Писаренко, Л.П. Середа // Зб. наук. пр. Вінницького державного аграрного ун-ту: Серія «Технічні науки». – Вінниця, 2009. – Вип. 2. – С.63–66.
53. Середа Л.П. Ресурсозберігаючий процес виготовлення силових гідроциліндрів сільськогосподарських машин / Л.П. Середа, Ю.Б. Паладійчук, Р.В. Будяк // Науково–технічний прогрес у розвитку машин і засобів механізації сільського господарства: Матер. наук.–техн. конф. – Вінниця: ВДАУ, 2009. – С.15–18.
54. Мальнев В.И. Исследование усилий, возникающих при алмазном шаржировании / В.И.Мальнев, В.В.Маковецкий // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 1. – С. 61–63.

55. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
56. Посвятенко Е.К. Технологічне забезпечення якості деталей машин при протягуванні / Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Резание и инструмент в технологических системах. – 2003. – Вып.64. – С. 8–22.
57. А.с. 1466916 СССР, МКИ В24В 39/02//В21С 51//00. Динамометр для определения контактных давлений при деформирующем протягивании / Э.К. Посвятенко, О.А. Розенберг, А.Д. Крицкий, С.А. Родюков. – Опубл. 23.03.89. – Бюл. № 11.
58. Родюков С.А. К вопросу о распределении нормальных давлений по длине контакта деформирующего элемента/ С.А. Родюков // Физические явления при резании и холодном пластическом деформировании металлов. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1988. – С. 143–150.
59. Посвятенко Э.К. Научное обоснование эффективности процесса деформирующе–режущего протягивания. Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля АН Украины, 1993. – 433 с.
60. Посвятенко Едуард Підвищення зносостійкості сталених різальних інструментів / Посвятенко Едуард, Посвятенко Наталія // Матеріали міжнародної конференції „Sakon’06”: Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2006. – С. 265–270.

РАЗДЕЛ 8

ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ С СОЗДАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ

Одним из наиболее эффективных методов повышения конструктивной прочности изделий является применение материалов с ультрамелким зерном, в том числе нанокристаллических. Однако их получение в промышленных масштабах для массивных изделий представляет очень серьезную проблему. В настоящее время вопрос решается в двух направлениях – изготовление изделий из нанокристаллических порошков по технологии порошковой металлургии [1] и использование таких методов объемного воздействия на металл как термомеханическая обработка [2], гидроэкструзия [3], равноканальное угловое прессование [4, 5] и другие способы интенсивной пластической деформации, иногда с последующей начальной стадией рекристаллизации [6, 7].

Все перечисленные методы технологически достаточно сложны и имеют ряд недостатков. Производство деталей из порошков сопровождается остаточной и неравномерной пористостью, что снижает механические характеристики. Кроме того, поскольку порошинки нанокристаллического размера очень активны, процесс требует специальной защиты от взаимодействия с окружающей средой, а это еще более усложняет технологию. Методами объемного деформирования с высокими степенями в большинстве случаев удается получить ультрамелкое зерно (~ 200–250 нм), а не истинную наноструктуру.

Очень существенной проблемой также является сохранение упрочнения, достигнутого в заготовке, при последующей обработке изделия, поскольку такие материалы крайне неравновесны, а детали, как правило, требуют окончательного термического упрочнения.

Гораздо проще получить наноструктуру не по всему сечению, а только на поверхности, что в настоящее время достигается интенсивной поверхностной пластической деформацией, ультразвуковой ударной обработкой, нанесением разного рода покрытий, в том числе, ионно-плазменных. Эти воздействия не только модифицируют свойства поверхностного слоя, но могут принципиально изменить деформационное поведение изделия в целом и его механические характеристики.

Известно, что поверхность изделий даже без какой-либо специальной обработки обладает особыми свойствами, отличающимися от свойств внутренних

областей [8]. Это прежде всего связано с нескомпенсированностью межатомных связей на поверхности, что, по данным Т. Судзуки, снижает напряжение начала работы источников Франка-Рида примерно вдвое. Вследствие этого начальные акты пластического течения, как правило, связаны с поверхностными слоями. Так, в работе [9] установлено, что при деформировании АРМКО-железа напряжением, соответствующим площадке текучести, деформация поверхностных слоев составила 2,52 %, внутренних – всего 0,84 %.

Исследования поведения твердого тела при деформации послужили основанием для выдвижения концепции физической мезомеханики, согласно которой поверхностный слой является самостоятельной функциональной подсистемой, радикально влияющей на деформационное поведение тела и его свойства [10].

Деформационное поведение тела после какого-либо энергетического воздействия на его поверхность определяется взаимодействием внутренних дислокаций с поверхностью. При их переходе в более жесткую среду (модуль сдвига поверхности $G_{\text{пов}} >$ модуля сдвига внутренних областей $G_{\text{вн}}$) происходит накопление дислокаций на границе с более жесткой средой, что приводит к охрупчиванию. Если же $G_{\text{пов}} < G_{\text{вн}}$ (этот случай соответствует переходу дислокаций непосредственно в атмосферу), количество дислокаций в поверхностном слое уменьшается, и охрупчивание не происходит.

В реальном случае поведение изделия при деформировании сильно зависит от наличия на поверхности концентраторов напряжений (царапин, надрезов, субмикроскопических трещин). Это влияет на определяемые при испытаниях свойства, хотя сами по себе прочностные и пластические характеристики металла внутренних слоев могут оставаться неизменными. Поэтому при испытаниях всегда оговаривается механическая обработка, обуславливающая шероховатость поверхности образцов и ее дефектность.

В данной работе сопоставлены механические характеристики образцов, полученные при испытаниях на растяжение и на усталость, в зависимости от состояния их поверхности после различных способов воздействия.

8.1. Методика исследований

Для исследования были выбраны поверхностные воздействия в виде шлифования, полирования и ионно-плазменной обработки (ИПО), причем свойства определяли после обеих стадий этой обработки – после ионной бомбардировки (ИБ) без нанесения покрытия и после его нанесения. Указанным воздействиям подвергали непосредственно стандартные разрывные образцы диаметром 5 и 10 мм, что позволило оценить влияние вида обра-

ботки на их поведение и механические свойства при растяжении.

ИПО осуществляли на установке ННВ–66 И1 «Булат». ИБ выполняли низкоэнергетическими ионами Ti (1–3 кэВ) в среде аргона, после чего на поверхность в атмосфере азота наносилось покрытие TiN . Учитывая хрупкость покрытия, его толщину ограничивали (~ 1 мкм), чтобы избежать растрескивания слоя при испытаниях образцов на растяжение. Главным условием выбора режима ИПО было исключение разогрева образца выше температуры предварительного отпуска для предотвращения разупрочнения металла. После ряда экспериментов был выбран следующий режим: ток дуги 95–105 А, напряжение на держателе образца 1–1,1 кВ, время бомбардировки около двух минут. В процессе обработки образцы вращались с помощью планетарного механизма со скоростью 8–9 об/мин.

В качестве материала выбран ряд конструкционных сталей, широко используемых в машиностроении, в частности, в двигателестроении (18ХГТ, 20Х, 40Х, 60Г). Исходной термической обработкой для сталей 18ХГТ, 20Х, 40Х было улучшение, для 60Г – закалка со средним отпуском. Сталь 20Х, не содержащая титана, использована для анализа распределения ионов Ti по глубине после ИПО.

Шероховатость поверхности измеряли профилографом-профилометром TR–200 (радиус вершины алмазного щупа 5 мкм). Для оценки изменений состояния поверхности после разных обработок измеряли микротвердость на микротвердомере PMT–3 и нанотвердость. Измерение нанотвердости проводили на нанотвердомере Nanoindenter II (MTS Systems Corporation, Oak Ridge, USA) индентором Берковича – трехгранной алмазной пирамидой с углом при вершине $65,3^\circ$ и радиусом закругления ~ 200 нм. Испытания проводились по такой схеме:

- нагружение до нагрузки 10 мН;
- выдержка в течение 15 с;
- уменьшение нагрузки на 80%;
- полная разгрузка индентора.

Скорость увеличения нагрузки была постоянной (0,5 мН/с). Для определения распределения нанотвердости по глубине поверхностного слоя была использована методика среднего контактного давления [11].

Рентгеноструктурный анализ проводили на установке ДРОН–3 в излучении K_α –Cr с регистрацией линий (110) и (211). Этим методом определяли напряжения первого σ_I и второго рода σ_{II} , размер L областей когерентного рассеяния (ОКР), плотность дислокаций ρ . Профиль линий аппрокси-

мировали функцией Гаусса. Для определения σ_1 применяли $\sin^2\psi$ – метод. Микроструктуру поверхности и распределение элементов по глубине (для образцов, подвергнутых ИПО) изучали на растровом электронном микроскопе РЭМ–106 производства ОАО SELMI с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРА).

Микроструктуру изучали при помощи металлографического микроскопа UIT MicroMet-I-102 BD, растрового электронного микроскопа РЭМ-106 и сканирующего зондового атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47H-PRO (NT-MDT, Россия). Данный прибор оснащен собственной системой виброизоляции для получения сверхвысокого разрешения, позволяет исследовать большие образцы до $100 \times 100 \times 20$ мм за счет использования схемы сканирования кантилевером.

Были проведены испытания на растяжение (при статическом нагружении) и на усталость (при приложении циклической нагрузки). Образцы для испытания на растяжение подвергали шлифованию, в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84, а также для сравнения растягивали образцы после полирования и после удаления шлифованием модифицированного слоя, созданного ИБ. Образцы для усталостных испытаний изготавливали в соответствии с ДСТУ 2824–94 по второму классу точности (окончательная обработка – полирование).

Испытания образцов с диаметром рабочей части 7,5 (сталь 60Г) и 10 мм (сталь 40Х) проводили на машине МУИ–6000, в которой реализуется принцип постоянства заданной величины нагружения в течение всего времени нахождения под нагрузкой. Был применен жесткий цикл нагружения – чистый изгиб с вращением. Нагрузка изменялась по симметричному синусоидальному циклу ($R = -1$). Частота нагружения была 2480 об/мин. База испытаний составляла 10^7 циклов. Об изменении сопротивления усталостному разрушению судили по циклической долговечности.

Стабильность показателей механических характеристик оценивали средним квадратическим отклонением S .

8.2. Результаты исследований

Изменение свойств при испытаниях на растяжение. На рис. 8.1 приведены первичные кривые растяжения для стали 18ХГТ после разной поверхностной обработки. Все кривые построены в одном масштабе, что позволяет их сопоставить и сделать выводы относительно изменения свойств.

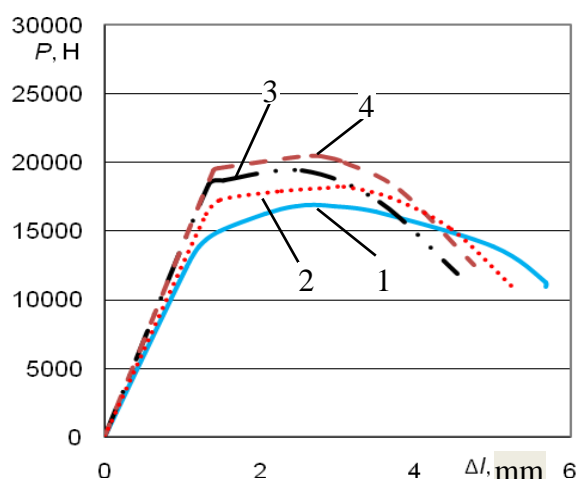


Рис. 8.1 – Кривые растяжения стали 18ХГТ:
 1 – исходное состояние (улучшение), шлифованный образец;
 2 – то же, полированный образец; 3 – шлифованный образец + ИБ;
 4 – шлифованный образец + ИБ + TiN

Уже из этого рисунка отчетливо видно, что состояние поверхности заметно влияет на вид диаграммы растяжения. Характеристики прочности и пластичности, рассчитанные по этим кривым, сведены в табл. 8.1, где также указана шероховатость Ra и среднее квадратическое отклонение S , характеризующее разброс значений прочностных характеристик. В скобках показан прирост (+) прочности по сравнению с соответствующим состоянием.

Таблица 8.1 – Механические свойства, их средние квадратические отклонения (S) и шероховатость (Ra) образцов после разной обработки; сталь 18ХГТ; исходное состояние – улучшение

№	Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	Ra , мкм
1	Исх. шлиф.	854; $S = 13$	717; $S = 15$	18	64	0,49
2	Исх. полир.	934 (+ 9 %); $S = 24$	875 (+22 %); $S = 26$	16	64	0,12
3	Исх. шлиф. + ИБ	1003 (+ 17 % по ср. с 1, + 7 % по ср. с 2); $S = 10$	962 (+ 34 % по ср. с 1, + 10 % по ср. с 2); $S = 13$	15	67	0,17
4	Исх. шлиф. + ИБ+ TiN	1056 (+ 24 % по ср. с 1, + 5 % по ср. с 3); $S = 31$	1007 (+40 % по ср. с 1, + 5 % по ср. с 3); $S = 33$	15	67	0,29
5	После удале- ния слоя	852; $S = 14$	716; $S = 14$	18	64	0,47

Из приведенных данных следует однозначный вывод - поверхностное воздействие значительно увеличивает показатели прочности. Так, переход от шлифования к полированию (№ 2), заметно снижая шероховатость, повышает σ_B на 9 %, а $\sigma_{0,2}$ на 22 %, хотя свойства сердцевины массивного образца (диаметр 5–10 мм) при полировании измениться не могут. Однако при

этом почти вдвое увеличивается разброс показателей прочности S . Таким образом, существенное упрочнение достигается только после очень тщательной полировки. Случайная царапина, становясь концентратором напряжений, может свести весь эффект упрочнения на нет.

После ИБ σ_b и $\sigma_{0,2}$ возрастают еще значительно (№ 3 по сравнению с № 1), а разброс их значений уменьшается. Нужно особо подчеркнуть, что относительное удлинение δ сохраняется на достаточном уровне, а относительное сужение ψ (более представительная характеристика, определяющая надежность материала), несмотря на очень значительное упрочнение, даже возрастает. Последующее нанесение покрытия TiN дополнительно повышает прочность, хотя и незначительно (образец № 4).

Следует отметить, что у полированного образца (№ 2) шероховатость Ra меньше, чем у образца № 3, а прочностные характеристики более высокие именно в образце № 3 (после ИБ). Еще больше увеличивается Ra после нанесения покрытия, главным образом, за счет капель Ti (покрытие наносили без сепарирования капельной фазы). В то же время происходит дополнительное, хотя и небольшое, упрочнение (образец № 4 по сравнению с № 3), однако стабильность свойств ухудшается. Эти данные свидетельствуют, что шероховатость поверхности – важный фактор, но для ИПО – не решающий.

Очень важным результатом является полное снятие упрочнения после удаления поверхностного слоя, модифицированного ИБ (№ 5). На рис. 8.1 кривая растяжения для этого состояния не показана, поскольку она совпадает с кр. 1 в пределах погрешности эксперимента. Это свидетельствует о том, что упрочняющий эффект имеет поверхностный характер. Подробнее этот результат обсужден в подразделе 8.3.

Качественно такие же результаты получены и для других сталей. Поскольку исследовались образцы разных диаметров, можно сделать некоторые заключения о роли масштабного фактора. Экспериментальные данные позволяют утверждать, что в исследованном диапазоне размеров (5–10 мм) его влияние незначительно (отличие составляет не более 1 %).

Влияние ИБ на циклическую долговечность. Большинство деталей машин и конструкций, в том числе двигателей, работает под действием циклических напряжений и подвержены усталости. Подсчитано, что более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения происходит в результате циклического нагружения [12].

Общеизвестно, что усталостное разрушение начинается с поверхности, а следовательно, предел выносливости изделия и другие показатели,

характеризующие сопротивление усталостному разрушению, зависят от состояния поверхностного слоя (наличия микротрещин, царапин, пористости, поверхностных напряжений). Изложенные в предыдущем подразделе исследования показали, что модифицированный слой, возникающий при ИБ, существенно влияет на механические характеристики образцов при статических испытаниях на растяжение. Представлялось очень важным с практической точки зрения исследовать возможность изменять такой обработкой и свойства изделий, подвергаемых циклическому нагружению.

Эксперименты были выполнены на образцах из сталей 40Х и 60Г. Выбор сталей обоснован практическими соображениями. Из стали 40Х изготавливают валы, оси, шестерни и др., т.е. детали, которые работают в условиях многократно повторяющихся циклических нагрузок. Сталь 60Г относится к рессорно-пружинным, а одно из самых важных требований к данным изделиям – высокая усталостная прочность.

Как уже отмечалось, критерием усталостной прочности служила циклическая долговечность, что часто практикуется при сравнении материалов и обработок. Испытания проводились на ГП «Завод им. В.А. Малышева». Напряжение и диаметры образцов были выбраны на основании заводского опыта – для менее прочной стали 40Х – 10 мм, для более прочной – 60Г – 7,5 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 8.2.

Как видно из табл. 8.2, при напряжении 380 МПа образец стали 40Х без ИБ разрушился после 297600 циклов. Образец же после ИБ при таком напряжении не разрушился. Его разрушение зарегистрировано после увеличения напряжения до 430 МПа (на 13%). При этом, количество циклов до разрушения возросло в ~ 1,5 раза.

Таблица 8.2 – Влияние ИБ на циклическую долговечность сталей

Материал и обработка	Величина напряжений, МПа	Количество циклов до разрушения	Результат испытаний
Сталь 40Х, без ИБ	380	297600	разрушился
Сталь 40Х, после ИБ	430	453840	разрушился
Сталь 60Г, без ИБ	380	937440	разрушился
Сталь 60Г, после ИБ	550	1116000	не разрушился

Еще большее увеличение циклической долговечности наблюдается у образцов из рессорно-пружинной стали 60Г: без ИБ они разрушились через 937440 циклов при напряжении 380 МПа. После ИБ даже при повышении напряжения на 44 % – до 550 МПа (максимальном для образцов диаметром 10 мм) они выдержали более 1 млн. циклов и не разрушились.

Таким образом, было убедительно показано, что обработка поверхности ИБ повышает свойства не только при статических, но и при циклических нагрузках.

8.3. Анализ результатов

Из табл. 8.1 видно, что ИПО обеспечивает получение очень высоких значений механических характеристик изделий (σ_b и $\sigma_{0,2}$ повышаются соответственно на 24 и 40 %). Такого прироста прочности без потери пластичности не дает ни один из известных объемных методов упрочнения, изменяющих свойства материала по всему сечению изделия. Как правило, максимальный прирост показателей прочности, не сопровождающийся охрупчиванием, после таких обработок составляет не более 15 %.

Важно отметить, что наибольший вклад в рост прочности вносит операция ионной обработки (№ 3 по сравнению с № 1), а последующее нанесение покрытия TiN дополнительно упрочняет образец всего на 5 % (№ 4 по сравнению с № 3). Таким образом, на ИБ приходится ~ 74 % общего роста σ_b и ~ 85 % повышения $\sigma_{0,2}$.

Исходя из современных представлений о факторах, определяющих поведение изделий при деформировании и их механические характеристики, среди возможных причин получения уникальных свойств после ИБ можно назвать такие.

1. Изменение тонкой структуры поверхностного слоя (измельчение областей когерентного рассеяния, увеличением плотности дислокаций, рост микронапряжений), что может повлиять на поведение образца при растяжении, несмотря на сохранение свойств сердцевины на исходном уровне.

2. Возникновение поверхностных напряжений сжатия, которые, как известно, положительно влияют на механические свойства изделий.

3. Залечивание поверхностных дефектов (уменьшение шероховатости).

4. Проникновение при бомбардировке ионов Ti на большую глубину и вызванное этим увеличением прочности внутренних слоев образца.

5. Волновой характер переноса энергии упругой волны, возникающей при бомбардировке, на значительные расстояния от обрабатываемой поверхности, что может привести к глубинному упрочнению.

6. Повышение твердости поверхности после ИПО.

7. Создание на поверхности тонкого слоя с особой структурой и свойствами, которая и определяет деформационное поведение образца при сохранении исходных механических характеристик сердцевины.

Все указанные факторы были проанализированы на образцах улучшен-

ной стали 18ХГТ. Результаты рентгеновских исследований сведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3 – Тонкая структура и макронапряжения образцов улучшенной стали 18ХГТ после разной обработки

№ образца	Метод обработки	$L, \text{\AA}$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\sigma_{\text{II}}, \text{МПа}$	$\rho, \text{см}^{-2}$	$\sigma_{\text{I}}, \text{МПа}$
1	Шлифование	380	0,40	80	$4,8 \cdot 10^8$	–20
2	Полирование	90	1,23	250	$5,8 \cdot 10^9$	–330
3	Шлифование + ИБ	100	1,67	340	$4,2 \cdot 10^9$	–150

Из табл. 8.3 видно, что полирование (№ 2) по сравнению со шлифованием (№ 1) существенно меняет тонкую структуру – в 4 раза уменьшается размер ОКР L , на порядок повышается плотность дислокаций ρ , заметно растут микронапряжения σ_{II} и особенно макронапряжения σ_{I} . При этом в полированном образце уменьшается шероховатость (с 0,49 до 0,12, табл. 8.1). Этими причинами можно объяснить значительный прирост характеристик прочности полированного образца, хотя, естественно, свойства металла сердцевины не изменились.

Практически такие же изменения тонкой структуры (с учетом погрешности при определении ее параметров рентгеновским методом) наблюдаются и после ИБ шлифованного образца (№3). В то же время макронапряжения σ_{I} в этом образце заметно ниже, чем после полирования (№2). Если бы данный фактор был определяющим для прочностных характеристик, следовало ожидать их снижения после ИБ. На самом же деле показатели прочности растут (табл. 8.1, №№ 2 и 3). Отсюда можно заключить, что ни изменения тонкой структуры, ни величина сжимающих напряжений не могут объяснить очень высоких показателей прочности после ИБ.

То же можно сказать и о шероховатости – после нанесения покрытия шероховатость увеличивается, по сравнению с ИБ. Однако, несмотря на это, прочностные характеристики возрастают (образцы №№ 3 и 4, табл. 8.1). Отсюда можно сделать вывод, что шероховатость сильно влияет на свойства образцов, не подвергавшихся ИПО, но не является основным фактором, ответственным за рост конструктивной прочности образцов после такой обработки. Поэтому для объяснения обнаруженного эффекта следует искать другие причины.

В литературе, посвященной ИПО, довольно распространенным является мнение об упрочнении сердцевины изделий за счет проникновения бомбардирующих ионов на значительную глубину. «Эффект дальнего действия» при ИПО подробно проанализирован в работах [13, 14]. На основе данных около 40 работ для разных материалов, различных бомбардирующих ионов и условий облучения авторы показали, что глубинное упрочнение, как прави-

ло, имеет место при обработке поверхности высокоэнергетическими ионами (с энергией от 20 до 500 кэВ) и мощными дозами облучения, т. е. при ионной имплантации. Фиксируемая глубина изменения микротвердости и дислокационной структуры даже для таких высоких энергий обычно составляет от 1 до 10 мкм. В нашем же случае бомбардировка осуществлялась низкоэнергетическими ионами (1–3 кэВ). Тем не менее в данной работе было изучено распределение ионов Ti по глубине на стали 20Х, не содержащей в своем составе титана, как после ИБ, так и после нанесения покрытия (рис. 8.2).

Из рис. 8.2, а видно, что после ИБ на поверхности образца количество титана достигает ~ 6 %. В основном, он содержится в виде капель. При анализе поперечных шлифов Ti уже не регистрировался на расстоянии от поверхности ~ 1 мкм.

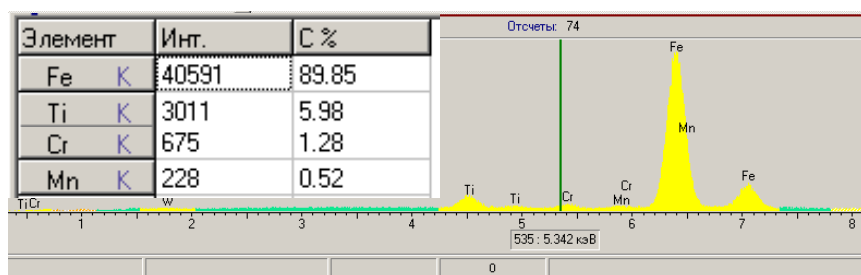
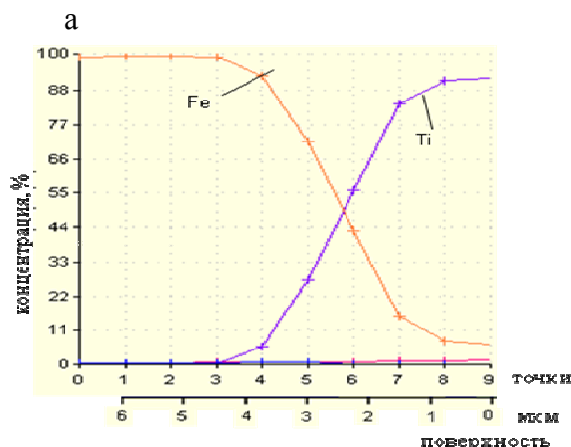


Рис. 8.2 – Химический состав на поверхности образца после ИБ (а) и распределение элементов по сечению образца с покрытием TiN (б); сталь 20Х



б

После нанесения покрытия TiN на самой поверхности количество титана близко к 92 %, но уже на глубине 4 мкм он не фиксируется (рис. 8.2, б). Таким образом, даже при нанесении покрытия, которое происходит при более высокой температуре и длится дольше, ионы Ti проникают на небольшую глубину.

Сопоставление этих результатов с влиянием ИБ без покрытия и с покрытием на рост прочности (табл. 8.1, №№ 3 и 4) однозначно свидетельствует об отсутствии корреляции между уровнем упрочнения и глубиной проникновения ионов Ti. Так, после ИБ толщина слоя, содержащего Ti, не превышает 0,05 % площади поперечного сечения образца, а доля общего

повышения $\sigma_{0,2}$ составляет 85 %. После же нанесения покрытия глубина проникновения титана увеличивается до 0,29 % площади, а дополнительное упрочнение составляет всего 5 %. Таким образом, упрочнение изделий после ИПО не связано с проникновением ионов Ti на значительную глубину.

Существует мнение, что глубинное упрочнение может быть вызвано изменением дислокационной структуры внутренних объемов облучаемых объектов под воздействием волнового переноса энергии упругой волны, возникающей при ИБ [15]. Для проверки роли этого фактора была измерена микротвердость вдоль (по осевому сечению) и поперек образцов до и после ИБ (рис. 8.3).

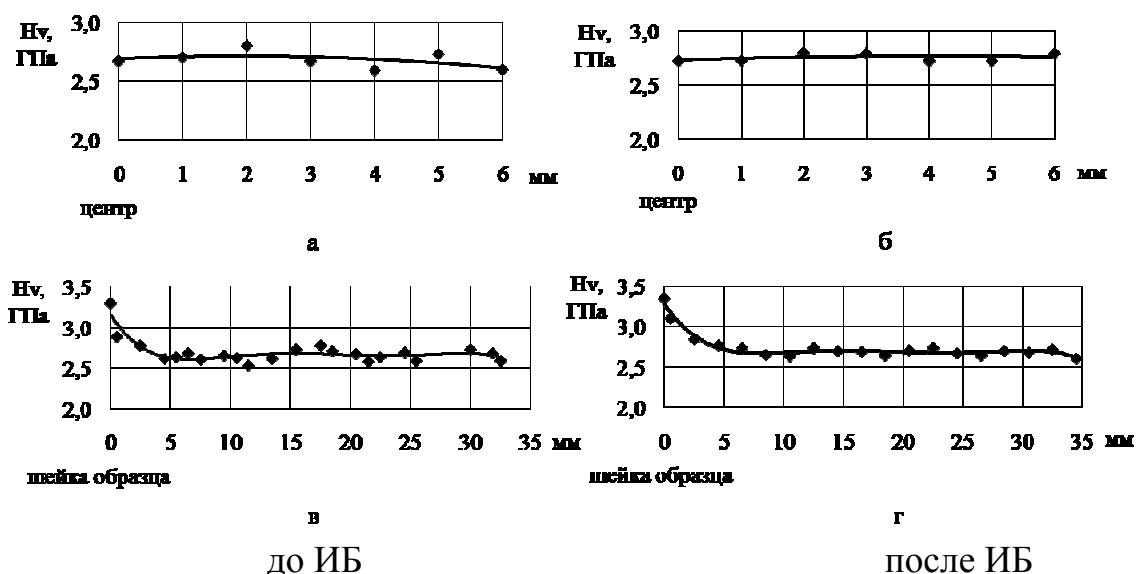


Рис. 8.3 – Распределение микротвердости образцов в поперечном (а, б) и продольном (в, г) сечениях; а, в – до ИБ; б, г – после ИБ; сталь 18ХГТ, улучшение

Как видно из рисунка, микротвердость центральных зон образцов после ИБ сохраняется на исходном уровне ~ 2,7 ГПа.

Можно было бы предположить, что метод микротвердости недостаточно чувствителен, чтобы обнаружить изменение дислокационной структуры на глубине. Однако наклеп в шейке образцов отчетливо регистрируется – твердость в этих участках увеличивается примерно на 18 % (рис. 8.3, в, г). Если судить по приросту на 17 % временного сопротивления после ИБ (табл. 8.1), то, учитывая известные корреляционные связи, твердость центральных областей в случае глубинного упрочнения также должна была бы возрасти на такую же величину. Это изменение сопоставимо с упрочнением в шейке за счет наклепа, и по микротвердости было бы зафиксировано.

На основании всего сказанного можно заключить, что обнаруженный эффект очень значительного повышения конструктивной прочности образца после ИБ не связан с глубинным упрочнением.

Для получения сведений об изменениях, вызываемых ИБ в тонком

поверхностном слое (менее 1 мкм), был применен метод измерения нанотвердости. Для исключения возможного влияния легирующих элементов и предварительной упрочняющей термической обработки исследованию подвергали отожженную сталь 20. Были выбраны две глубины индентирования: 200 нм (нагрузка на индентор $P \sim 3$ мН) и 500 нм ($P \sim 16$ мН). Вид кривых наноиндентирования показан на рис. 8.4.

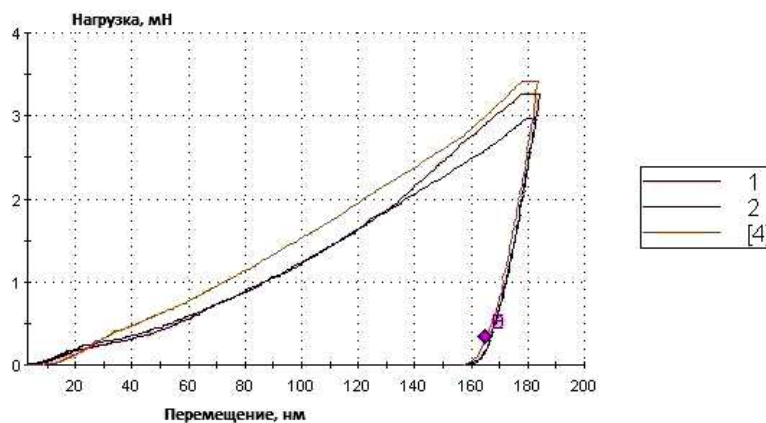


Рис. 8.4 – Кривые индентирования после ИБ; сталь 20, отжиг

Кривые индентирования обрабатывали по методике В. Оливера и Дж. Фара [16]. Измерение нанотвердости при разных нагрузках позволило установить, что уже на глубине 500 нм ее значения соответствуют исходному состоянию (до ИБ) – $\sim 2,3$ ГПа. Эти результаты подтверждают изложенные выше данные о том, что толщина модифицированного слоя после ИБ во всяком случае не превышает 1 мкм.

Зависимость нанотвердости от глубины внедрения индентора, подсчитанное по методике [11], приведена на рис. 8.5 (максимальная нагрузка на индентор 3 мН).

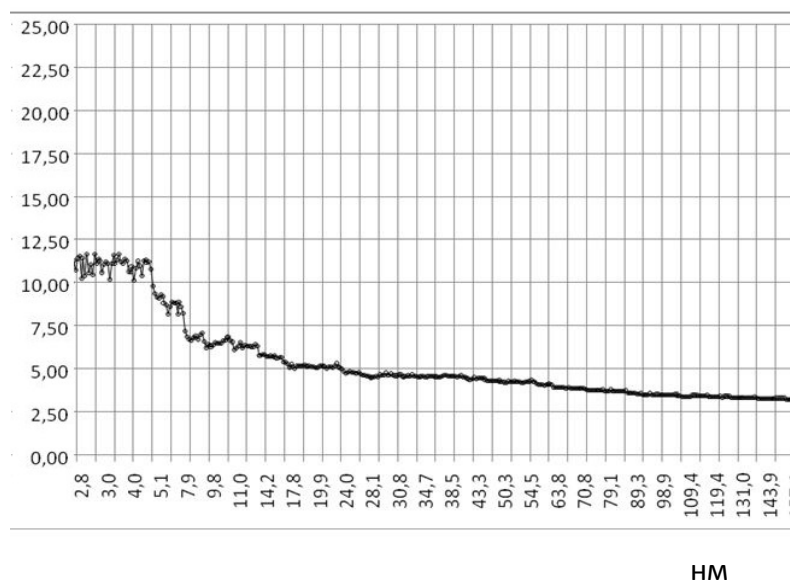


Рис. 8.5 – Распределение нанотвердости по глубине после ИБ

Видно, что на поверхности нанотвердость повышается до 12 ГПа при исходной $\sim 2,3$ ГПа. Толщина слоя с такой нанотвердостью ~ 5 нм. Затем она резко снижается, на глубине около 18–20 нм ее значение составляет ~ 5 ГПа, а дальше монотонно уменьшается, постепенно приближаясь к исходной. Экстраполируя ход кривой до значений нанотвердости 2,3 ГПа, можно ориентировочно определить глубину, на которую распространяется модифицирование поверхности при ИБ низкоэнергетическими ионами. Она составляет около 350 нм.

Таким образом, комплексные исследования (данные рентгеноспектрального анализа о распределении ионов Ti по глубине, измерения микро- и нанотвердости) дают основание совершенно однозначно утверждать, что модифицированный ИБ слой имеет наноразмерную толщину [17].

Аналогичные данные получены и для легированной стали 18ХГТ

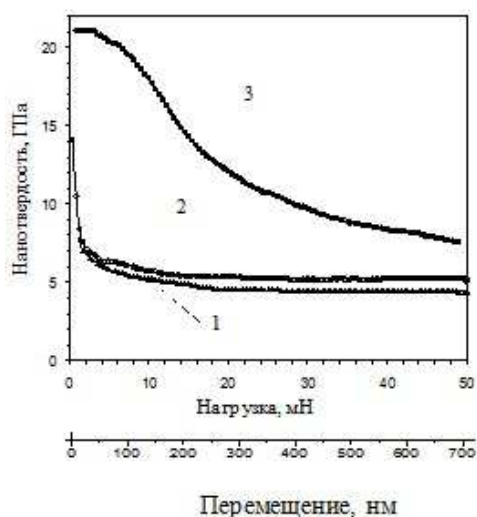


Рис. 8.6 – Зависимость нанотвердости от нагрузки на индентор: 1 – исходное состояние (улучшение); 2 – ИБ; 3 – ИБ + TiN; сталь 18ХГТ

(рис. 8.6), что говорит об общности результатов независимо от состава стали и ее предварительной термической обработки. Из этого рисунка видно, что уже для исходного состояния наблюдается некоторый рост нанотвердости (кривая 1), что объясняется наклепом при подготовке шлифа.

Можно было бы думать, что значительный рост прочности связан с повышением нанотвердости на поверхности. Но после нанесения покрытия TiN толщиной всего ~ 1 мкм нанотвердость увеличивается до 24 ГПа и медленнее спадает по глубине, т.е. упрочненная поверхностная зона шире (см. рис. 8.6, кр. 3). В то же время прочность, по сравнению с ИБ без покрытия, увеличивается не более чем на 5 % (табл. 8.1). Таким образом, дело не в повышении твердости поверхности.

Следует обратить внимание еще на одну особенность ИБ – резкое уменьшение разброса значений нанотвердости – с 0,34 ГПа без ИБ до 0,09 ГПа после нее. Это наблюдалось и при испытании образцов на растяжение (табл. 8.1).

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что все рассмотренные факторы вносят определенный вклад в изменение поведения образцов при деформации, однако ни один из них не может объяснить достижения

уникально высоких прочностных характеристик именно после ИБ.

Известно, что при ИБ происходит залечивание поверхностных дефектов за счет распыления поверхностного слоя, уменьшения шероховатости и притупления остроты впадин, что подтверждено и в данном исследовании (рис. 8.7). В соответствии с теорией Гриффитса, это приводит к росту вязкости разрушения, т.е. уменьшает хрупкость. Однако сопоставление профилей после ИБ и полирования позволяет заключить, что дело не только в сглаживании поверхности. Как видно из рис. 8.7, наименьшая шероховатость получается после полирования, тогда как свойства выше после ИБ. Следовательно, залечивание дефектов – не единственный и не основной процесс, приводящий к росту конструктивной прочности после ИБ.

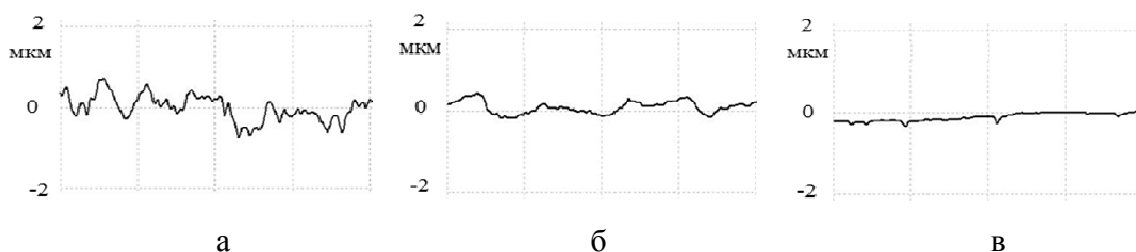


Рис. 8.7 – Профиль поверхности образца после разной обработки:
а – шлифование; б – шлифование + ИБ; в – полирование

Изменения микроструктуры поверхности после ИБ иллюстрирует рис. 8.8 (см. цветн. вклейку).

В исходном состоянии регистрируется феррит с небольшим количеством перлитной составляющей (рис. 8.8, а). После ИБ низкоэнергетическими ионами при кратковременном воздействии (около 2 мин) в ферритных зернах появляется развитая субструктура с размером элементов в пределах 500–750 нм. Структурные изменения в феррите особенно отчетливо видны при большом увеличении (рис. 8.8, в и г). По нашему мнению, именно такая субструктура обуславливает особое поведение образцов в процессе деформации, исключающее охрупчивание при столь высоком упрочнении.

Феномен повышения механических свойств материала при залечивании поверхностных дефектов был описан академиком А.Ф. Иоффе в 20-х годах прошлого века («эффект Иоффе» [18]). При растяжении образцов каменной соли диаметром 6 мм на воздухе хрупкое разрушение происходило при напряжении 5 МПа. В воде же, когда подтравливался поверхностный дефектный слой, σ_b увеличилось до 1600 МПа, что близко к теоретической прочности (согласно расчетам ~ 2000 МПа). Испытание образцов в насыщенном солевом растворе, когда подтравливание поверхности исключает

лось, не вызывало упрочнения.

Позже аналогичный эффект был получен Ю.В. Барановым при растяжении металлических образцов в электролите – ему удалось деформировать вольфрам на 80–90 % в щелочной среде. При этом прочность повысилась на 30 %. Автор назвал это «эффект Иоффе для металлов» [19].

Отличие наших исследований от [17, 18] заключается в том, что в цитируемых работах растяжение осуществлялось в среде, которая удаляла не только исходные поверхностные дефекты, но и те, которые возникали в процессе деформации и могли вызвать образование концентраторов напряжений и в итоге привести к хрупкому разрушению образцов. В нашем же случае образцы растягивались на воздухе, т.е. в отсутствии среды, которая могла бы удалить поврежденный при деформации поверхностный слой. Тем не менее, образец, несмотря на огромное упрочнение, оставался пластичным. Для получения дополнительных сведений о строении поверхностного слоя, модифицированного ИБ, было проведено исследование с применением атомно-силового электронного микроскопа [20].

8.4. Топография поверхности после ионно-плазменной обработки

Анализ профиля поверхности и оценка ее шероховатости в нашей работе, как и в большинстве исследований, связанных с этим вопросом, выполнен контактным методом с помощью щупа. Результаты на рис. 8.7 представляют двухмерные изображения. Однако поскольку топология поверхности трехмерна, любая двухмерная оценка дает неполное ее описание и сопряжена с погрешностями, вызванными следующими причинами: большой радиус при вершине (в нашем случае 5 мкм), проскальзывание при испытании, существенные нагрузки на поверхность, низкая разрешающая способность в вертикальном направлении ($\sim 0,1$ мкм).

Последнее время в инженерной механике для оценки эксплуатационных свойств деталей машин все шире используется трехмерный анализ шероховатости поверхности с помощью сканирующих зондовых микроскопов, работающие в режиме АСМ бесконтактным способом. Разрешающая способность последних по вертикальной оси составляет сотые, а в некоторых случаях тысячные доли нанометра [21,22].

В большинстве наших исследований исходным состоянием поверхности образцов было шлифование. Для атомно-силовой микроскопии такая подготовка поверхности слишком груба, поэтому оценка изменения профиля поверхности образцов после ИБ выполнены на полированных образцах.

Аналізу подвергали как двухмерные, так и трехмерные фотографии.

Трехмерное профилометрирование позволяет более точно оценить реальные характеристики поверхности. Повышается информативность результатов в связи с увеличением определяемых независимых параметров. С помощью компьютера можно визуализировать поверхность, т.е. детально представить ее топографию, а также получить ряд новых параметров

Характеристики шероховатости поверхностей, полученные при трехмерных измерениях, в соответствии с ISO 4287:1997, обозначаются буквой *S* (от англ. surface –поверхность). По смыслу обозначения аналогичны соответствующим параметрам, определяемым по профилю поверхности: *Sy* – размах высот (аналог *Rmax*), *Sz* – десять точек по высоте (аналог *Rz*), *Sa* – средняя арифметическая шероховатость (аналог *Ra*), *Sq* – средняя квадратическая шероховатость (аналог *Rq*).

Изображения поверхности, полученные в атомно-силовом микроскопе, после шлифования и полирования представлены на рис. 8.9 (см. цветн. вклейку).

В табл. 8.4 приведены данные о рельефе поверхности, полученные в АСМ с обработкой данных в соответствии с ISO 4287:1997 (программа Solver P47H_PRO, MDT). Для сопоставления показаны также значения *Ra*.

Таблица 8.4 – Шероховатость поверхности после разной обработки по данным АСМ

Обработка	Параметр шероховатости				
	<i>Sy</i> , нм	<i>Sz</i> , нм	<i>Sa</i> , нм	<i>Sq</i> , нм	<i>Ra</i> , мкм
Шлифование	530	261	43	54	1,26
Полирование	144	73	15	18	0,12
Полирование+ИБ	249	124	21	29	0,18

Из анализа данных, приведенных в табл. 8.4, следует, что качественно параметры шероховатости при разных методах измерения меняются одинаково. По сравнению со шлифованием полирование снижает параметр *Sy* (максимальную высоту пиков) примерно в 3,7 раза. После ИБ полированного образца эта высота увеличивается в 1,7 раза, однако по сравнению со шлифованным максимальная высота пиков снижается более чем в 2 раза. Аналогичные выводы можно сделать и относительно других показателей – все они после ИБ несколько возрастают, что отмечалось и при исследовании контактным щупом (значения *Ra*), но по сравнению со шлифованием остаются значительно меньшими.

Различие в количественных значениях вполне объяснимо: при определении *Ra* базовая длина профиля составляла 0,25–0,8 мм, а при использовании АСМ площадь сканируемой поверхности была 50×50 мкм.

Поскольку в наших исследованиях ионной бомбардировке подвергались именно шлифованные образцы, такое сопоставление позволяет утверждать, что глубина рельефа после ИБ находится в наноразмерном диапазоне ($Sa = 21$ нм). Это хорошо совпадает с измерениями нанотвердости.

8.5. Физические явления, обуславливающие повышение конструктивной прочности изделий при ионной бомбардировке

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют, что для достижения высокой конструктивной прочности вовсе не обязательно создавать ультрамелкую субструктуру или наноструктуру по всему сечению изделия. Достаточно модифицировать тонкий поверхностный слой (толщиной менее 1 мкм) путем применения ИБ, что гораздо проще и дает устойчивые результаты.

Известно, что наноструктуры характеризуются очень высокой прочностью, но, как правило, охрупчивают изделие [1]. Для уменьшения склонности к хрупкому разрушению рекомендуется создание смешанных структур, сочетающих нано- и субструктурные элементы [23]. Указанный комплекс свойств достигается тем, что в деформации поверхностного слоя значительную роль играют зернограничное проскальзывание и ротационные моды (поворот зерен). Это обеспечивает релаксацию внутренних напряжений.

Такой механизм деформации энергетически более предпочтителен по сравнению с дислокационным. Его реализация возможна при наличии на границах очень большого количества точечных дефектов, что характерно для наноструктур. По мнению авторов работы [24], это имеет место при многих видах воздействия на поверхность – соударении мелких частиц, тонком измельчении материала, виброобработке. Наличие же в слое субмикроструктурных элементов расширяет упруго-пластическую область, повышает устойчивость к образованию шейки и сохраняет высокую пластичность при столь значительном упрочнении.

Как было показано в данной работе, именно такая структура формируется при модифицировании поверхности бомбардировкой низкоэнергетическими ионами, что и обеспечивает очень значительное упрочнение без потери пластичности.

Аналогичное явление повышения прочности изделий поверхностным наноструктурированием было получено в работах [25]. В этих исследованиях использовалась ультразвуковая ударная обработка специальным индентором. Предложенный нами метод проще [26]. Он кратковременен, малозатратен, может быть применен для изделий любой формы после окончательной термической и механической обработки без дополнительных тепловых воздействий, обеспечивает одновременное и равномерное энергетическое воздействие на всю поверхность

изделия, что гарантирует стабильность свойств.

8.6. Производственные испытания

Метод опробован на реальных шатунных болтах и шпильках. Как известно, эти детали относятся к исключительно ответственным. В процессе работы они подвергаются переменным нагрузкам одного знака, основными из которых являются сила инерции поступательно движущихся масс поршня и шатуна и центробежная сила вращающихся масс, расположенных над плоскостью разъема кривошипной головки. При недостаточной жесткости элементов шатунной группы опорные поверхности головки и гайки болта могут перекашиваться, что приводит к возникновению изгибающих напряжений, дополнительно ужесточающих условия работы. Обрыв болтов (шпилек) связан с тяжелыми аварийными последствиями. Анализ характера поломок этих деталей показал, что только ~ 20 % из них носит усталостный характер [27].

Исследования осуществляли на партии болтов (10 шт.), которые приобретали у официального дилера завода, серийно выпускающего данный тип продукции для указанного ДВС. Все болты подвергали измерению на предмет разброса значений макро- и микрогеометрических характеристик, а также механических свойств. Испытания болтов на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 1759.4–87 «Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытания».

В соответствии с ГОСТ 4543–71 режим термической обработки деталей из стали 40ХН заключается в закалке от 820 °С с высоким отпуском (500 °С). Такой режим для гладкого прутка обеспечивает временное сопротивление не менее 980 МПа, условный предел текучести – не менее 785 МПа.

Вид болтов показан на рис. 8.10 (см. цветн. вклейку).

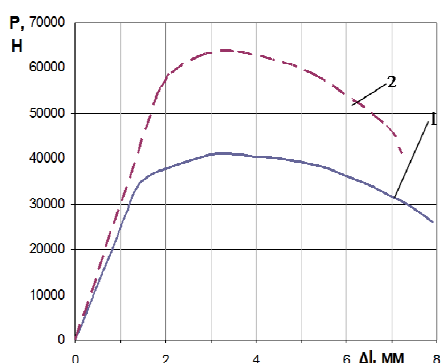


Рис. 8.11 – Кривые растяжения шатунных болтов: 1 – в исходном состоянии (без ИБ); 2 – после ИБ

Из этого рисунка видно, что после ИБ болты изменили цвет – приобрели золотистый оттенок, что связано с оседанием на поверхности капель Ti. Об этом шла речь ранее.

Кривые растяжения болтов приведены на рис. 8.11.

Видно, что после ИБ резко повысилась прочность, тогда как относительное удлинение изменилось незначительно, охрупчивания болтов не произошло.

Расчет показателей прочности выпол-

няли по номинальной площади поперечного сечения в соответствии с ГОСТ 24705–81 «Резьба метрическая. Основные размеры». Номинальный наружный диаметр резьбы равнялся 10 мм.

Следует отметить разброс начальных диаметров болтов и их шероховатости. Так, диаметр изменялся от номинального (10 мм) до 9,5 мм, а шероховатость – от 1,16 до 0,376. Для уменьшения погрешности при расчете показателей прочности номинальная площадь для каждого болта подсчитывалась конкретно для данного диаметра. Что же касается шероховатости, то после ИБ она становилась примерно одинаковой.

Результаты испытаний приведены в табл. 8.5. В скобках показан прирост прочности свойств. Для шероховатости приведены крайние значения, а для состояния после ИБ ее средние значения в скобках.

Таблица 8.5 – Свойства и шероховатость шатунных болтов до и после ИБ

Состояние	Механические свойства			Ra , мкм
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	
Без ИБ	574	443	12	0,376–1.16
После ИБ	970 (+ 69 %)	815 (+ 84 %)	10	0,526–0,554 (0,536)

Из этой таблицы видно, что для изделий с технологическими концентраторами напряжений (резьба) эффект упрочнения после ИБ еще выше, чем для гладких образцов (табл. 8.1). Отметим еще один важный результат. Выше было сказано, что в соответствии с ГОСТ 4543–71 для образцов без технологических концентраторов напряжений σ_b должно быть равным 980 МПа, а $\sigma_{0,2}$ – 785 МПа. ИБ позволяет на изделии с резьбой получить σ_b всего на 1 % ниже чем у гладкого, а $\sigma_{0,2}$ даже на 4 % выше.

Остановимся еще на одном очень существенном моменте. Как было показано, после снятия поверхностного слоя, созданного ИБ, эффект упрочнения полностью исчезает. Следовательно, речь идет не об изменении свойств материала (его механические характеристики по сечению образца не меняются), а об изменении поведения изделия под действием нагрузок, что в конечном итоге и приводит к существенному росту конструктивной прочности изделия в целом. В связи с этим необходимо четко различать понятия «конструкционная прочность», характеризующая комплекс свойств материала, и «конструктивная прочность», относящаяся к изделию из данного материала. Иными словами, из одного и того же металла с одинаковой конструкционной прочностью можно получить изделия с разной конструктивной прочностью в зависимости от технологии обработки их поверхности.

Следует подчеркнуть, что в технологии ИПО первый ее этап (ИБ) ра-

рассматривается как вспомогательная операция, назначение которой – очистить от загрязнений и активировать поверхность для обеспечения высокой адгезии между наносимым покрытием и основой. Данные эксперименты свидетельствуют, что ионную бомбардировку необходимо рассматривать как самостоятельный и очень эффективный метод повышения конструктивной прочности изделий.

Анализ полученных и описанных результатов в разделе материалов дает основание для следующих выводов.

1. Показано, что состояние поверхности изделия оказывает очень большое влияние на его поведение при деформации и конструктивную прочность, хотя свойства материала внутренних слоев сохраняются на исходном уровне. Так, только за счет полирования поверхности, т.е. уменьшения шероховатости, σ_b можно повысить, по сравнению со шлифованием, на 9 %, $\sigma_{0,2}$ на 22 % без снижения пластичности. Однако полированные образцы очень чувствительны к качеству поверхности, поэтому управление свойствами изделий только уменьшением Ra с практической точки зрения малоэффективно.

2. Ионно-плазменная обработка, не меняя свойств сердцевины и не охрупчивая изделие, для гладких образцов увеличивает σ_b на 24 %, $\sigma_{0,2}$ на 40 %, причем, основное повышение характеристик прочности достигается при ионной бомбардировке (~ 74 % общего роста σ_b и ~ 85 % возрастания $\sigma_{0,2}$). При этом разброс показателей резко снижается.

3. Обнаруженный эффект является следствием двух процессов – заживления поверхностных дефектов (уменьшения шероховатости, притупления остроты впадин) и особого поведения при деформации тонкого поверхностного слоя (менее 1 мкм), сочетающего субмикроскопические и наноструктурные элементы. В деформации поверхностного слоя значительную роль играют зернограничное проскальзывание и ротационные моды, что обеспечивает релаксацию внутренних напряжений. Наличие же в слое субмикроструктурных элементов расширяет упруго-пластическую область, повышает устойчивость к образованию шейки и сохраняет высокую пластичность при столь значительном упрочнении.

4. Термины «конструкционная прочность» и «конструктивная прочность» по своему смыслу совершенно различны. Первый относится к материалу, второй – к изделию. Из одного и того же материала с одинаковой конструкционной прочностью можно получить изделия с разной конструктивной прочностью в зависимости от технологии обработки их поверхности.

5. Ионная бомбардировка является самостоятельным, простым в осуществлении, малозатратным, кратковременным и очень эффективным методом повышения конструктивной прочности реальных изделий, особенно при наличии конструктивных концентраторов напряжений.

Литература к разделу 8

1. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Gleiter H. // *Acta mater.* – 2000. – Vol. 48. – P. 157 – 163.

2. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2-х т. Металлургия. – 1968.

3. Гидропрессование как малоотходный способ изготовления изделий с улучшенными свойствами / [Дьяченко С.С., Александров Н.Г., Милославская Е.Л., Золотко В.А.] – Х.: Изд-во «Основа» при ХГУ, 1991. – 105 с.

4. Объемные наноструктурные металлы и сплавы с уникальными механическими свойствами для перспективных применений / [Р.З. Валиев, Д.В. Гундеров, М.Ю. Мурашкин, И.П. Семенова] // *Вестник УГАТУ.* – Уфа: УГАТУ, 2006. – Т. 7, №3 (16). – С. 23–34.

5. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации / Ф.З. Утяшев. – Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, №1. – С. 7–25.

6. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

7. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с.

8. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

9. Шабалин В.И. О механизме пластической деформации металлов / В.И. Шабалин // *Докл. АН СССР.* – 1962. – Т. 144, № 3. – С. 551–554.

10. Панин В.Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле / В.Е. Панин, А.В. Панин // *Физическая мезомеханика*, 2005. – Т. 8, №5. – С. 7–15.

11. Дуб С.Н. Испытание твердых тел на нанотвердость / С.Н. Дуб, Н.В. Новиков // *Сверхтвердые материалы* – 2004. – №6. – С. 16–33.

12. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов / В. С. Золотаревский // М.: – Металлургия. – 1983. – 352 с.

13. Шаркеев Ю.П. Дислокационные структуры и упрочнение ионно-

имплантированных металлов и сплавов / Ю.П. Шаркеев, А.Н. Диденко, Э.В. Козлов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1994. – №5. – С. 92–108.

14. Козлов Э.В. Физическая картина модификации поверхностных слоев и объема металлов и сплавов при воздействии низкоэнергетической плазмы / Э.В. Козлов, И.В. Терешко, Н.А. Попова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1994. – №5. – С.127–140.

15. Кунченко Ю.В. О глубине зоны модификации свойств (упрочнения) материалов облучением при $T \leq 100$ °С низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда / Ю.В. Кунченко, В.В. Кунченко, Г.Н. Картмазов // ФИП – 2009. – Т. 7, № 1–2. – С. 46–53.

16. Oliver W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, № – 6. – P. 1564–1583.

17. Дьяченко С.С. Роль состояния поверхностного слоя стальных изделий в их поведении при деформировании. / Дьяченко С.С., Пономаренко И.В., Дуб С.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 1 (в печати).

18. Иоффе А.Ф. Механические свойства кристаллов / А.Ф. Иоффе // Успехи физических наук. – Ленинград. – 1928. – Т. VIII, вып. 4. – С. 441–482.

19. Баранов Ю.В. Эффект А.Ф. Иоффе на металлах / Баранов Ю.В. – М.: МГИУ, 2005. – 140 с.

20. Дьяченко С.С. Топографические особенности поверхности стальных изделий после различных технологических воздействий / С.С. Дьяченко И.В. Пономаренко // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – ДонНТУ. – 2014. – № 1(47). – С. 128-138.

21. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии / Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Раздел: «Исследование структуры и свойств». – М., 1998. – Т. 65, №9. – С. 27–37.

22. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебн. пособ. для студ. старш. курсов высш. учебн. зав-ий / В.Л. Миронов. – Нижний Новгород: РАН Ин-т физики микроструктур, 2004. – 114 с.

23. Weissmüller J. Deforming nanocrystalline metals: new insights, new puzzles / Weissmüller J, Markmann J. // Advanced engineering materials. – 2005. – Vol. 7. – P.202 – 207.
24. Андриевский Р.А. Прочность наноструктур / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // Успехи физических наук, 2009. – Т. 179, №4. – С. 337–
25. Панин В.Е. Поверхностные слои как синергетический активатор пластического течения нагруженного твердого тела / В.Е. Панин // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 62–68.
26. Патент України на корисну модель 55911, МПК С 2104. Спосіб підвищення конструктивної міцності сталевих виробів / Пономаренко І.В., Д'яченко С.С., Подригало М.А., Лобанов В.К., Пашкова Г.І.; Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201008421; заявл. 05.07.10; опубл. 27.12.10, Бюл. № 24.
27. Косырев С.П. Повышение надежности шатунных болтов высокофорсированных дизелей / С.П. Косырев, А.В. Разуваев, Л.А. Сорокина // Двигателестроение. – 2001. – №4. – С. 5–6.

РАЗДЕЛ 9

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ

9.1. Дискретное электроискровое упрочнение деталей двигателей на примерах моделей КамАЗ-740 и типа Д80, 5Д49

На основании результатов, полученных на образцах и изложенных в разд. 3, дискретному электроискровому упрочнению по оптимальным режимам были подвергнуты коренные и шатунные шейки реальных коленчатых валов типа Д80 из легированного высокопрочного чугуна. После дискретного упрочнения выполнялось чистовое шлифование, обработка масляных отверстий и полирование. Для испытаний на усталость из коренных и шатунных шеек были вырезаны образцы. Шероховатость рабочей поверхности шеек R_a равнялась 0,32–0,16 мкм, что соответствует требованиям рабочего чертежа.

Твердость упрочненной зоны (пятна) находилась в пределах 600–700 HV (54–60 HRC) при твердости сердцевины (основного металла) 255–302 HV (25–30 HRC). Глубина упрочненной зоны составляла 0,25–0,39 мм, глубина подслоя равна 0,06–0,08 мм, а его твердость – 407–440 HV (41–43 HRC). При визуальном осмотре поверхностей шеек как в упрочненной зоне, так и за ее пределами литейных дефектов и трещин не обнаружено.

Испытания на усталость проводили на машине МУИ, максимальная нагрузка при этом согласно результатам тензометрии составляла 22 МПа, коэффициент асимметрии $R = 0,3$.

Исследования показали, что разрушение одного образца произошло после 321 000 циклов, второго – после 199 000 циклов. В обоих случаях разрушение произошло по галтели R 8 мм шатунных шеек на участке, прилегающем к щеке. Это свидетельствует об отсутствии связи между местом усталостного разрушения и влиянием дискретного упрочнения. При этом число циклов до разрушения соответствует циклической долговечности коленчатых валов типа Д100 при нагрузке 22 МПа. Таким образом, на реальных валах установлено, что дискретное упрочнение деталей не приводит к снижению сопротивления изделия усталости и, следовательно, может быть рекомендовано для упрочнения коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей транспортных средств.

Коленчатый вал последнего ремонтного размера (четвертого) двигателя КамАЗ-740 (сталь 42ХМФА) после предварительного шлифования был

подвергнут дискретному упрочнению, которое осуществлялось на токарном станке модели 165 (рис. 9.1, см. цветн. вклейку).

По завершению дискретного упрочнения коленчатый вал проходил чистовое шлифование и все дальнейшие операции, предусмотренные технологическим процессом. Твердость упрочненных зон (пятен) на рабочих поверхностях шеек менялась в пределах 665–870 HV (58–66 HRC) при твердости сердцевины (основного металла) 390–435 HV (40–45 HRC).

Экономический эффект может быть получен как на заводе-изготовителе, так и на предприятиях, которые эксплуатируют и проводят капитальный ремонт тепловозов, их деталей и узлов, так и у потребителя. Общий экономический эффект от внедрения технологии дискретного упрочнения при капитальном ремонте коленчатых валов достигается за счет уменьшения энергетических затрат при их изготовлении и ремонте и увеличения ресурса их работы (табл. 9.1, 9.2).

Таблица 9.1 Нормативная исходная информация показателей экономического эффекта

№ з/п	Наименование показателя		5Д49	
			базовая	новая
1.	Нормативный коэффициент эффективности капиталовложения	E_n	0,15	0,15
2.	Расходы на устранение одного отказа детали (полная себестоимость), тыс. грн.	C_d	1800,00	530,00
3.	Стоимость коленчатого вала, тыс. грн.	C_d	1400,00	200,00
4.	Коэффициент вариации, характеризующий рассеяние ресурсов однотипных деталей	U_d	0,4	0,4

9.2. Оценка экономического эффекта от внедрения в производство дискретного электроискрового упрочнения коленчатых валов

В настоящее время на железных дорогах Украины эксплуатируется 835 единиц дизелей типа 5Д49, которые установлены в тепловозы 2ТЭ116, 2М62, ТЕП150, ТЭП70. Большинство из них исчерпали нормативный срок службы (десятки лет) и требуют капитального ремонта с заменой или восстановлением основных агрегатов и узлов, в частности, силовых установок тепловозов. Невозможность быстрого их обновления за счет закупок новых дизелей обусловлено тем, что все двигатели, которые находятся в эксплуатации, – иностранного производства, стоимость их достаточно высока. В связи с этим возникает необходимость в проведении капитального ремонта с обеспечением увеличения срока их эксплуатации.

Основным фактором повышения экономической эффективности капитального ремонта силовых агрегатов тепловозов является максимальное

использование остаточного ресурса деталей.

Таблица 9.2 – Результаты расчетов показателей экономического эффекта

№ з/п	Наименование показателя		5Д49	
			базовая	новая
1.	Амортизационный срок службы двигателя, лет – действующий – расчетный	T	16	31
2.	Годовая наработка двигателя – среднее, тыс. км	T _р	100,0	100,0
3.	Средний ресурс коленчатого вала, тыс. км – среднестатистический – расчетный (испытания)	T _д	300,0	420,0
4.	Общее количество двигателей 5Д49	n	835	835

Работоспособность двигателя, стабильность его технико-экономических характеристик в процессе эксплуатации в значительной степени зависят от срока службы и состояния коленчатого вала. При изготовлении очень важным показателем, определяющим эксплуатационные свойства, являются механические характеристики материала, точность технологического оборудования и качество изготовления рабочих поверхностей шеек. Оптимизация данных характеристик в значительной степени позволит увеличить ресурс как самой детали, так и двигателя в целом и, следовательно, значительно сократить затраты на ремонт и закупку запасных частей.

Для двигателей, подверженных капитальному ремонту с использованием технологии дискретного электроискрового упрочнения рабочих поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатых валов, экономический эффект обусловлен увеличением показателей ремонтпригодности и надежности (иллюстрируется на примере ОАО «Ижумский тепловозоремонтный завод», рис. 9.2, см. цветн. вклейку).

Как было указано выше, по железным дорогам Украины в эксплуатации находится 835 единиц дизелей Д49, которые через каждые 300 тыс. км. пробега или каждые три года эксплуатации в обязательном порядке проходят текущий ремонт (ТР) с их полной разборкой и дефектацией.

При ТР, как правило, более 80% коленчатых валов бракуется по задирам, износу, трещинами и т. п.

Учитывая изложенное, можно сказать, что каждый год ремонту подлежит около 200 коленчатых валов (шлифовка в ремонтный размер и упрочнение).

Отсюда общий экономический эффект у потребителя от использования технологии дискретного электроискрового упрочнения при ремонте коленчатых валов.

Коленчатые валы двигателей, отремонтированных с применением технологии дискретного электроискрового упрочнения рабочих поверхностей коренных и

шатунных шеек, по сравнению с традиционными технологиями, использующихся в машиностроительной промышленности Украины и за рубежом, обеспечивают:

- высокую ремонтпригодность при малой трудоемкости ремонта;
- высокую абразивную износостойкость;
- низкую изнашиваемость;
- сочетание высоких параметров прочности изделий и износостойкости.

Все перечисленные преимущества позволяют применять технологию дискретного упрочнения в различных отраслях народного хозяйства Украины, в частности:

- при упрочнении прокатных валков для горячего деформирования черного металла экономический эффект составляет 94,6 млн. грн.;
- при упрочнении прокатных валков для холодной деформации труб из нержавеющей сталей экономический эффект составляет 110,0 млн. грн.;
- при изготовлении деталей шпиндельных узлов крупногабаритных станков экономический эффект составляет 43,2 млн. грн.;
- при капитальном ремонте осей колесных пар экономический эффект составляет 23,4 млн. грн.;
- при капитальном ремонте автомобильных двигателей экономический эффект составляет 68,7 млн. грн.;
- при капитальном ремонте якорей тяговых электродвигателей экономический эффект составляет 5,0 млн. грн.

Вместе с учетом объектов военной техники годовой экономический эффект при использовании технологии дискретного электроискрового и других способов упрочнения в промышленности Украины составляет $E = 970,0$ млн. грн.

9.3. Улучшение характеристик и ресурса ДВС применением технологии модификации поверхностных слоев деталей из алюминиевых сплавов

Повышение ресурса и эксплуатационных характеристик дизельных двигателей является важнейшей проблемой железнодорожного транспорта. Частичное решение этой проблемы может быть достигнуто за счет оборудования дизелей тепловозов поршнями с корундовым слоем [1-4].

В локомотивном депо Харьков-Сортировочный подобраны 2 тепловоза ЧМЭЗ³ с дизелями K6S310DK, выпуска 1989 г. № 6830 и 6835, $V=163$ л, с турбонаддувом и промежуточным охлаждением воздуха, $n_{xx}=350$ мин⁻¹. При $n=750$ мин⁻¹ $N=1350$ л.с. (992кВт), на 3, 4-й позиции $N=190$ кВт. P_c на 0-й поз. 2,8–3,5 МПа, на 8–9 поз. 5,5 МПа, P_z при максимальной нагрузке 7,5 МПа.

Испытания двух тепловозов ЧМЭЗ проводятся на протяжении 19 лет специалистами депо Харьков-Сортировочный с участием научных сотрудников УкрДАЗТ и НТУ «ХПИ».

В октябре 1992 г. была выполнена технологическая гальвано-плазменная обработка комплекта из 6 поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3. Тепловоз прошел обкатку и реостатные испытания, которые показали соответствие всех рабочих характеристик техническим условиям. С 01.03.1993 г. он передан в маневровую работу в локомотивное депо Харьков Сортировочный с одновременным проведением эксплуатационных испытаний по согласованию со службами «Укрзалізниці». Контрольные наблюдения уровня эксплуатационных характеристик тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 осуществлялись при проведении реостатных испытаний во время текущих ремонтов.

Во время реостатных испытаний фиксировались параметры дизель-генератора тепловоза ЧМЭ-3 №6830 на режимах тепловозной характеристики. По этим данным были построены тепловозные характеристики ДВС (рис.9.3). После установки новых поршней с корундовым слоем перед эксплуатационными испытаниями на 8-м режиме была достигнута реостатная мощность 1040 кВт.

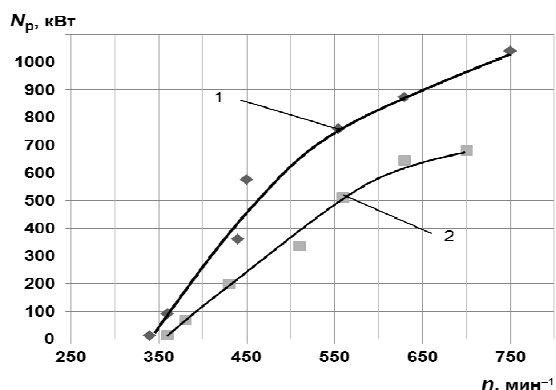


Рис. 9.3 – Тепловозные характеристики дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с корундовыми поршнями:
1 – 1.03.1993 г. после установки новых корундовых поршней;
2 – 10.11.2005 г. после наработки 93660 моточасов и проведения ТР-3

Из графика видно, что снижение реостатной мощности дизеля после наработки 93660 моточасов на 3, 4, 5, 6 и 7-м режимах составило от 100 до 200 кВт.

Увеличение эффективной мощности модернизированного дизеля, по сравнению с серийным (таблицы 9.3–9.4), объясняется, во-первых, снижением механических потерь на трение между гильзой и поршнем, так как коэффициент трения корундового слоя по гильзе в 8–10 раз меньше, чем поршня из алюминиевого сплава по гильзе. Во-вторых, корундовый слой на доньшке поршня способствует повышению эффективности сгорания топлива. Сокращение вре-

мени предпламенной подготовки топлива и его сгорания приводит к улучшению топливно-экономических показателей дизеля [5, 6].

Таблица 9.3 – Параметры дизель-генератора модернизированного тепловоза ЧМЕ-3 на режимах тепловозной характеристики

$n, \text{мин}^{-1}$	Тепловоз № 6830							
	Новая ЦПГ 20.02.1993 г.		Наработка 93660 мото- часов 29.11.05 г.		Наработка 114676моторочасов			
					до ТР-3 28.09.08 г		после ТР-3 17.01.09 г.	
	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А
290							86	343,6
330							139	555,3
340	60	200			95	400		
360	150	600	70	200				
380			140	500				
410							240	1066
420					170	800		
430			220	900				
440	300	1200						
450	360	1600						
480							296	1476
500					230	1100		
510			280	1200				
550							355	1589
555	380	2000						
560			320	1600				
620							368	2005
630	380	2300	340	1900				
690							347	2153
700			340	2000				
730							332,6	2235
750	400	2600						

Таблица 9.4 – Параметры дизель-генератора серийного тепловоза ЧМЭ-3 на режимах тепловозной характеристики

$n, \text{мин}^{-1}$	Тепловоз № 6835			
	Наработка 46512 мото- часов 09.09.2008 г.		Новая ЦПГ 05.11.2008 г.	
	U, В	I, А	U, В	I, А
280			49,7	193
340	70	200		
350			106,33	457,7
420	140	600	199,3	933,7
460			238,7	1250,3
480	230	1000		
560			267,7	1648,3
610			302	1875
680			331	1914,3

После наработки 93660 моточасов и проведения ТР-3 на 8-м режиме получена реостатная мощность 680 кВт.

После наработки 114676 моточасов перед проведением ТР-3 реостатные испытания тепловоза закончились при работе двигателя на 6-й позиции контроллера в связи со сбоем в работе регулятора числа оборотов. Двигатель выдержал реостатную нагрузку на 5-й позиции контроллера машиниста 253 кВт.

Дальнейшая эксплуатация до наработки 114676 моточасов привела к снижению реостатной мощности на 4-й позиции контроллера еще на 50 кВт, а на 5-м режиме – на 100 кВт. На доньшках поршней нагара практически не было (рис. 9.4, см. цветн. вклейку).

После проведения ТР-3 реостатная мощность двигателя выросла на всех режимах и на 7, 8 и 9-м режимах (рис. 9.5) превысила значение 740 кВт [1, 7, 8].

В период наработки реостатная мощность уменьшается, но на разных режимах неодинаково (рис. 9.6) [3].

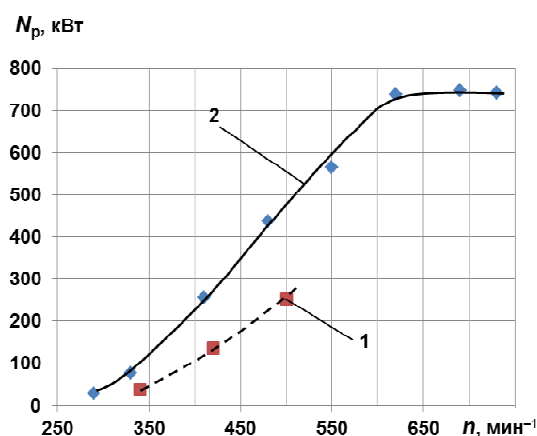


Рис. 9.5 – Тепловозные характеристики дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с корундовыми поршнями: 1 – после наработки 114676 моточасов до проведения ТР-3; 2 – после проведения ТР-3

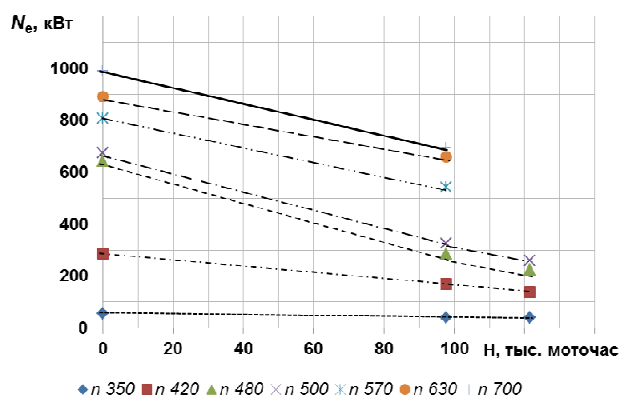


Рис. 9.6 – Снижение реостатной мощности дизеля с поршнями с корундовым слоем тепловоза ЧМЭ-3 на разных режимах в процессе эксплуатации

Рассмотрим результаты испытаний дизеля с серийными поршнями. На доньшке поршней серийного дизеля образовался нагар толщиной больше $1 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 9.7, см. цветн. вклейку), что оказывает отрицательное влияние на эффективность процесса сгорания, а соответственно и на эффективные показатели ДВС.

После проведения ТР-3 и замены всех гильз, поршней и поршневых колец серийный двигатель на 4-м режиме развил реостатную мощность 299 кВт, а на 8-м режиме – 633 кВт (рис. 9.8). Таким образом, реостатная

мощность на 4-м режиме после наработки 46512 моточасов и после капитального ремонта дизеля с заменой цилиндро-поршневых групп увеличилась на 69 кВт.

Сравнение характеристик модернизированного двигателя и серийного после установки новых деталей ЦПГ и проведения ТР-3 показывает, что модернизированный двигатель развивает значительно большую мощность по сравнению с серийным двигателем (рис. 9.9).

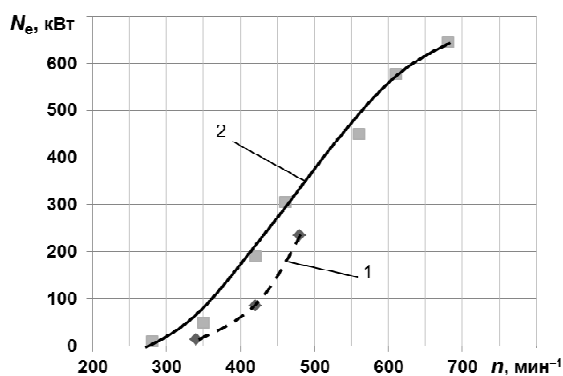


Рис. 9.8 – Тепловозные характеристики дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6835 с серийными поршнями: 1 – после эксплуатации 46512 моточасов до проведения ТР-3; 2 – после капитального ремонта и установки новых поршней и гильз

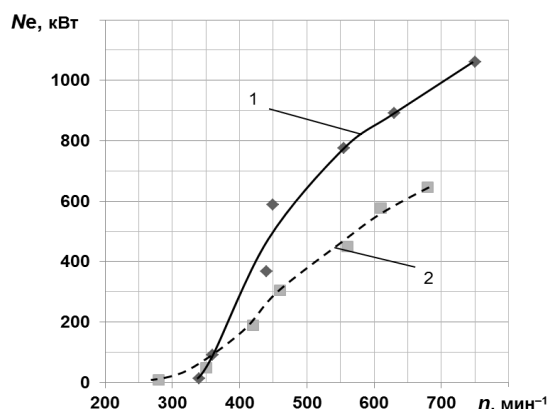


Рис. 9.9 – Тепловозные характеристики двигателей тепловозов после капитального ремонта и замены деталей ЦПГ: 1 – дизель тепловоза №6830 с поршнями с корундовым слоем; 2 – дизель тепловоза №6835 с серийными поршнями

Эта разность составила на 4-м режиме 160 кВт, на 5 – 250, на 6, 7, 8-м режимах – около 300 кВт. Так, на 8-м режиме модернизированный двигатель развил максимальную реостатную мощность 1040 кВт, а серийный только 633 кВт (рис. 9.10).

Таким образом, приведенные тепловозные характеристики реостатных испытаний дизелей серийной комплектации и модернизированного дизеля, оборудованного поршнями с корундовым слоем, показали значительное улучшение тепловозных характеристик модернизированного дизеля по сравнению с серийным, что обусловлено положительным влиянием корундового слоя поршней на механический КПД и рабочий процесс дизеля. После эксплуатации дизеля с поршнями с корундовым слоем (~ 114676 моточасов) превышение мощности уменьшилось, но всё же реостатная мощность дизеля с поршнями с корундовым слоем на 20 – 40 % выше реостатной мощности дизеля с серийными поршнями (рис. 9.10 – 9.13).

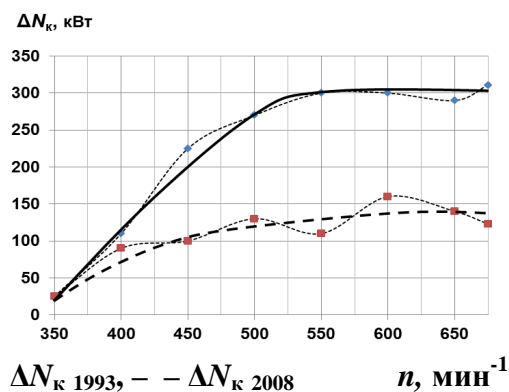


Рис. 9.10 – Превышение реостатной мощности дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с новыми поршнями с корундовым слоем над реостатной мощностью серийного дизеля

$\Delta N_{k 1993} = N_{k 1993} - N_c$; $\Delta N_{k 2008} = N_{k 2008} - N_c$ (тонкие линии – экспериментальные данные)

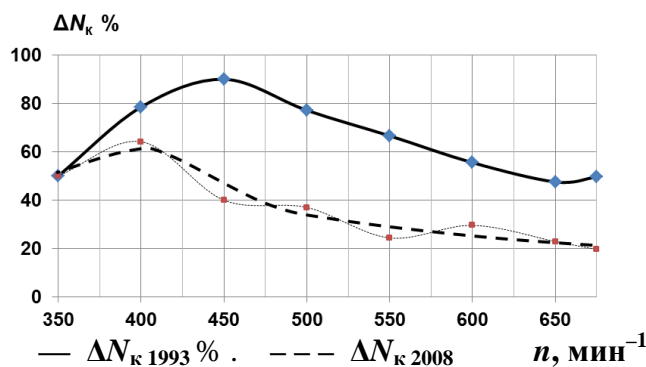


Рис. 9.11 – Процент превышения реостатной мощности дизеля тепловоза с новыми поршнями с корундовым слоем над реостатной мощностью дизеля тепловоза с серийными поршнями: $\Delta N_{k 1993} \%$ – с новыми поршнями с корундовым слоем; $\Delta N_{k 2008} \%$ – после наработки 114676 моточасов (тонкая линия – экспериментальные данные)

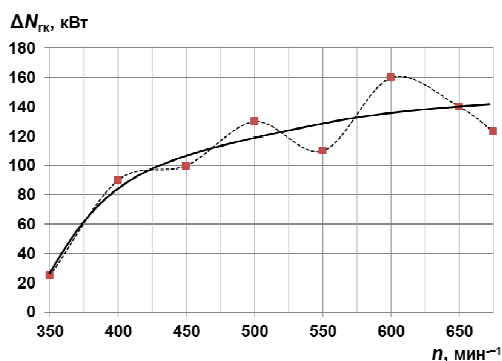


Рис. 9.12 – Превышение реостатной мощности (кВт) дизеля с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов над мощностью дизеля с новыми серийными поршнями (тонкая линия – экспериментальные данные)

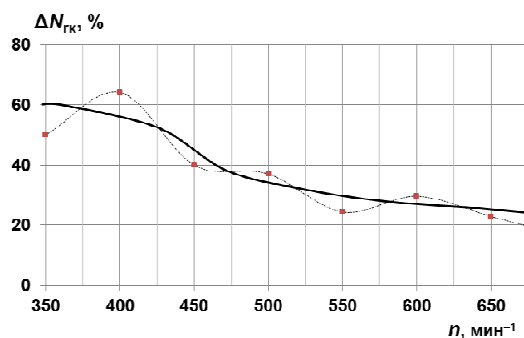


Рис. 9.13 – Процент превышения реостатной мощности дизеля с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов над мощностью дизеля с новыми серийными поршнями (тонкая линия – экспериментальные данные)

В результате реостатных испытаний на протяжении 19 лет установлено:

1. Реостатная мощность дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 с новыми поршнями с корундовым слоем значительно превышает реостатную мощность дизеля тепловоза № 6835 с новыми серийными поршнями. Установка новых поршней с корундовым поверхностным слоем в дизель тепловоза ЧМЭ-3 привела к увеличению максимальной реостатной мощности дизеля более чем на 20 % в сравнении с максимальной реостатной мощностью дизеля с серийными поршнями.

2. Увеличение реостатной мощности дизеля с поршнями с корундовым слоем наблюдается на всех режимах по тепловозной характеристике на 160 кВт и больше по сравнению с серийным дизелем.

3. Уровень снижения реостатной мощности дизеля с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов до проведения ТР-3 такой же, как у серийного дизеля после наработки 46512 моточасов.

Реостатные испытания тепловозных дизелей, выполняемые в депо Харьков-Сортировочный на протяжении 18 лет показали значительное снижение эффективного расхода топлива дизеля тепловоза при установке поршней с корундовым слоем. В процессе реостатных испытаний проводились замеры расхода топлива прибором "АИРТ-2", разработанным Украинской государственной академией железнодорожного транспорта и фирмой "РЕКОРД", поверенным ГП "Харківстандарт-метрологія" (свидетельство № 3383 от 09.07.2008 г.). Результаты замеров часового расхода топлива приведены в табл. 9.5 и на рис. 9.14.

Таблица 9.5 – Часовой расход топлива

Позиция контроллера	Число оборотов дизеля n , мин ⁻¹	Часовой расход топлива	
		серийного дизеля $B_{\text{д}}$, кг/ч	с поршнями с корундовым слоем $B_{\text{дк}}$, кг/ч
2	280	11,4	
2	290		15
3	330		34,2
3	350	28,2	
4	410		69,6
4	420	53,4	
5	460	89,4	
5	480		103,8
6	550		137,4
6	560	123	
7	610	138,6	
7	620		159
8	680	187,8	
8	690		191,4

В таблице 9.6 приведены значения удельного реостатного (тягового) расхода топлива серийного дизеля с новой группой деталей ЦПГ (g_r) и дизеля с поршнями с корундовым слоем (g_{rk}) после наработки 114676 моточасов, а на рис. 9.15 – 9.17 приведены графики удельного реостатного (тягового) расхода топлива.

Значительное снижение удельного тягового расхода топлива дизеля тепловоза ЧМЭ-3 при установке поршней с корундовым слоем происходит на 2-м, 3-м и 4-м режимах. Маневровый тепловоз в основном и работает на низких режимах. Так, на 4-м режиме при $n = 410 - 420$ мин⁻¹ удельный тяговый расход топлива снижается на 60–70 г/(кВт·ч) (рис. 9.16), то есть примерно на 20 % (рис. 9.17).

Таблица 9.6 – Удельный реостатный расход топлива

Режим	n , мин ⁻¹	g_r , г/(кВт·ч)	g_{rk} , г/(кВт·ч)
2	280	1194,9	
2	290		505,9
3	330		437,6
3	350	579,5	
4	410		271,3
4	420	286	
5	460	299	
5	480		237,7
6	550		264,9
6	560	278	
7	610	245,7	
7	620		215,3
8	680	296	
8	690		255,5

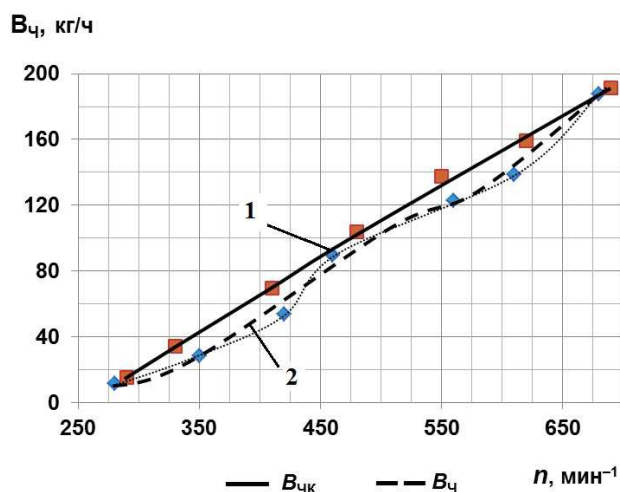


Рисунок 9.14 – Часовой расход топлива серийного дизеля $B_{\text{ч}}$ с новой ЦПГ (линия 1) и дизеля с поршнями с корундовым слоем $B_{\text{чк}}$ после наработки 114676 моточасов (линия 2). Тонкая линия – экспериментальные данные

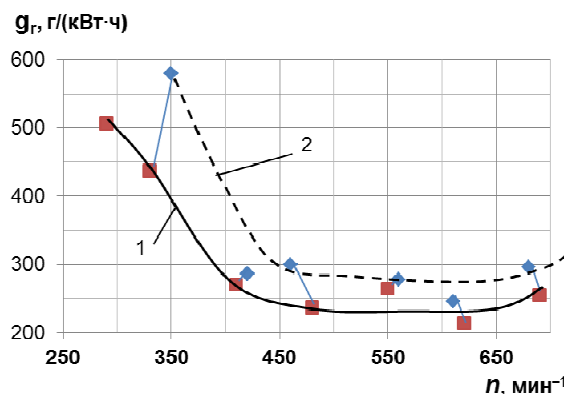


Рисунок 9.15 – Удельный реостатный (тяговый) расход топлива дизелей тепловозов ЧМЭ-3: 1 – с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов; 2 – серийного дизеля с новой ЦПГ

Максимальное значение реостатного (тягового) КПД дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем достигает 36 %, а дизеля тепловоза с серийными поршнями 31 %. (рис. 9.18). Практически на 5 – 8 режимах тяговый КПД дизеля с поршнями с корундовым слоем на 5 % выше (рис. 9.19).

Эксплуатационный удельный эффективный расход топлива теплового дизеля с поршнями с корундовым слоем. Для оценки влияния поршней с корундовым слоем на эксплуатационный расход топлива был проведен анализ работы тепловоза ЧМЭ-3 № 6830, оснащенного поршнями с ко-

рундовым слоем, и тепловозов № 4384, № 6835, оснащенных стандартными поршнями, работающих на Южном вокзале г. Харькова в одинаковых условиях и с практически одинаковым годовым пробегом. Расход топлива и пробег тепловоза за каждый месяц его работы учитывался диспетчерской службой по форме ТХО 5.

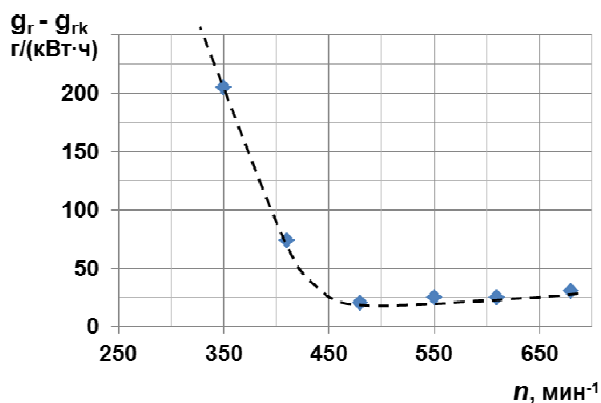


Рис. 9.16 – Величина снижения удельного реостатного расхода топлива (г/кВт·ч) дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на разных режимах при установке поршней с корундовым слоем

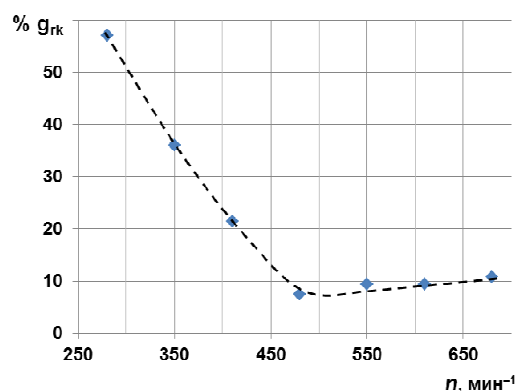


Рис. 9.17 – Процент снижения удельного реостатного расхода топлива дизеля тепловоза ЧМЭ-3 при установке поршней с корундовым слоем

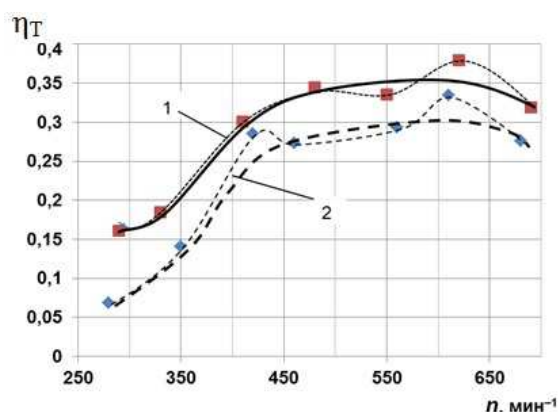


Рис. 9.18 – Реостатный КПД дизелей тепловозов ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем (η_{TK}) после наработки 114676 моточасов (1) и с серийными поршнями с новой ЦПГ (η_{TC}) (2). Тонкие линии – экспериментальные данные

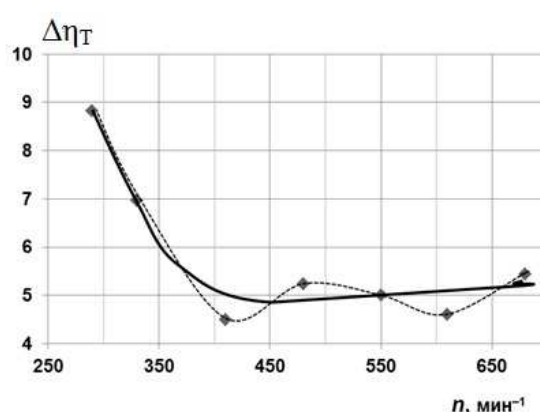


Рис. 9.19 – Превышение реостатного КПД дизеля с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов над КПД дизеля с серийными поршнями. Тонкая линия – экспериментальные данные

На основании данных ТХО 5 результаты расхода топлива и километ-
раж пробега указанных тепловозов по годам за 2005–2010 гг. приведены в
табл. 9.7, а на рис. 9.20–9.22 – графики пробега и расхода топлива.

В 2005–2008 гг. тепловозы находились на хозяйственных работах, а с
2009 года по 2011 год тепловоз № 6830 был направлен работать на горку.

Этим объясняется значительное увеличение расхода топлива и величины пробега.

Таблица 9.7 – Расход топлива и километраж пробега

Год	Тепловоз ЧМЭ-3 №6830		Тепловоз ЧМЭ-3 № 4384		Тепловоз ЧМЭ-3 № 6835	
	расход топлива, кг	пробег, км	расход топлива, кг	пробег, км	расход топлива, кг	пробег, км
2005	50245	26426	85690	31976		
2006	70707	35981	91215	33460		
2007	69738	36336	56350	21474	88555	26230
2008	73567	38683	80194	31165	60046	18336
2009	161792	72848	97585	38043		
2010	142079	66740	96716	34736		

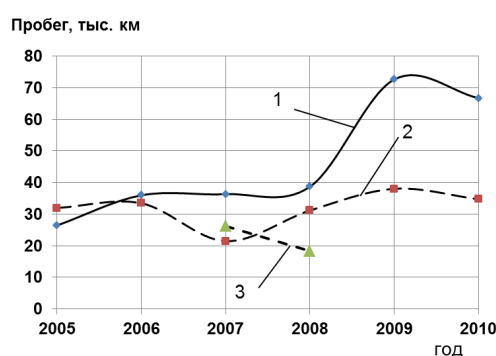


Рис. 9.20 – Пробег тепловозов ЧМЭ-3: 1 – тепловоз № 6830 с поршнями с корундовым слоем; 2 – тепловоз № 4384 с серийными поршнями; 3 – тепловоз № 6835 с серийными поршнями

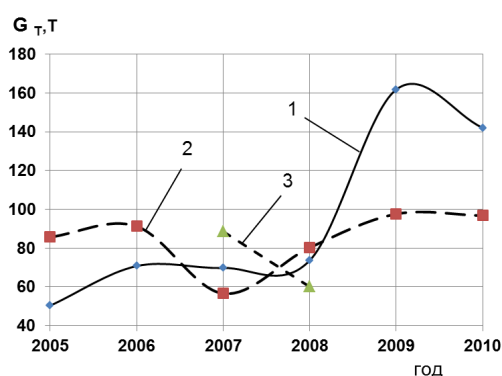


Рис. 9.21 – Расход топлива дизелями тепловозов ЧМЭ-3: 1 – тепловоз № 6830 с поршнями с корундовым слоем; 2 – тепловоз № 4384 с серийными поршнями; 3 – тепловоз № 6835 с серийными поршнями

Анализ их работы (табл. 9.8) показал, что в 2005–2010 гг. на 1 км пробега расход топлива тепловозом № 4384 превышает расход топлива тепловозом № 6830 на 0,8–0,45 кг/км, а тепловозом № 6835 – на 1,35–1,1 кг/км (рис. 9.23).

Таблица 9.8 – Фактический расход топлива тепловозами ЧМЭ-3

Год	Среднегодовой удельный расход топлива тепловозом № 6830, кг/км	Тепловоз № 4384		Тепловоз № 6835	
		Среднегодовой удельный расход топлива, кг/км	Превышение расходов 4384/6830 в %	Среднегодовой удельный расход топлива, кг/км	Превышение расходов 6835/6830 в %
2005	1,9013	2,679	40,90		
2006	1,9651	2,7261	38,72		
2007	1,9193	2,6241	26,85	3,3761	75,9
2008	1,9018	2,5732	26,1	3,2748	72,19
2009	2,220	2,565	15,54		
2010	2,1288	2,784	30,77		

Из рис. 9.23 видно, что среднегодовой удельный расход топлива дизеля тепловоза ЧМЭЗ № 4384 с серийными поршнями на 30–40 % превышает среднегодовой удельный расход топлива тепловоза № 6830. Становится очевидным, что при пробеге тепловозом в год около 40 тыс. км применение поршней с корундовым слоем позволит экономить от 20 до 25 тонн топлива в год.

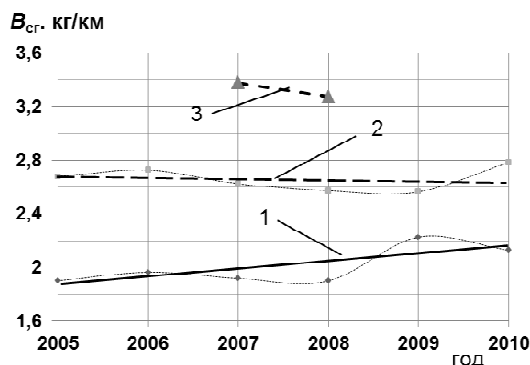


Рис. 9.22 – Среднегодовой удельный расход топлива тепловозами ЧМЭ-3 (кг/км): 1 – дизелем тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 с поршнями с корундовым слоем; 2 – дизелем тепловоза ЧМЭ-3 № 4384 с серийными поршнями; 3 – дизелем тепловоза ЧМЭ3 № 6835 с серийными поршнями

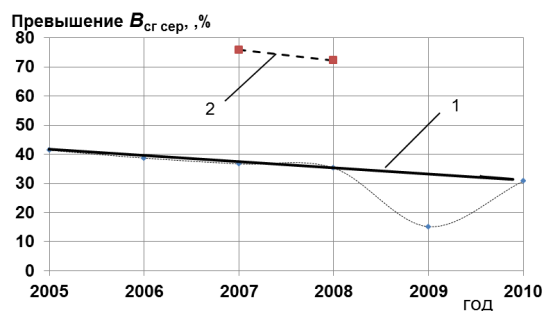


Рис. 9.23 – Процент превышения среднегодового удельного расхода топлива дизелями тепловозов ЧМЭ-3 с серийными поршнями над расходом топлива дизеля тепловоза с поршнями с корундовым слоем: 1– тепловоза ЧМЭ-3 № 4384; 2 – тепловоза ЧМЭ-3 № 6835

В табл. 9.9 приведены расчёты количества топлива, сэкономленного тепловозом с поршнями с корундовым слоем, по сравнению с количеством топлива, которое было бы израсходовано тепловозом с серийными поршнями.

Таблица 9.9 – Экономия топлива по годам эксплуатации тепловозом с поршнями с корундовым слоем

Год	Тепловоз ЧМЭ-3 № 6830. Расход топлива, кг	Тепловоз ЧМЭ-3 № 4384. Расход топлива, кг	Экономия топлива тепловозом № 6830, кг
2005	50245	70795	20370
2006	70707	98087	27380
2007	69738	95349	25611
2008	73567	99539	25972
2009	161792	186855	25063
2010	142079	185824	43745

При сравнении показателей расхода топлива тепловозов № 6830 и № 4384 видно, что в 2008 г. при пробеге тепловозом № 6830 38683 км было израсходовано 73567 кг топлива (см. табл. 9.7). При таком же пробеге тепловозом № 4384 было бы израсходовано $38683 \cdot 2,5732 = 99539$ кг топлива, т.е. на 25972 кг больше. Аналогично в 2010 г. при пробеге 66740 км тепловозом

№ 4384 было бы израсходовано на $66740 \cdot (2,7843 - 2,1288) = 43748$ кг топлива больше (табл. 9.9, рис. 9.24).

Всего сэкономлено топлива тепловозом с корундовыми поршнями за 6 лет работы 168491 кг.

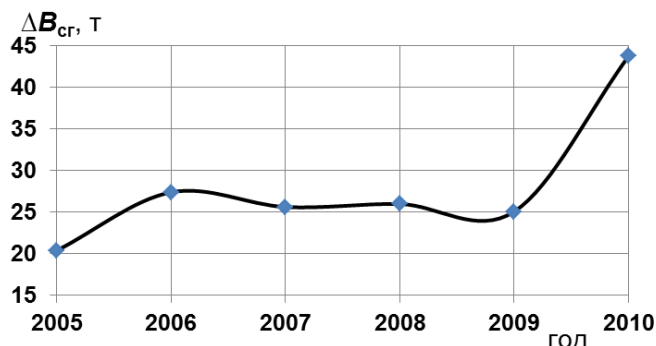


Рис. 9.24 – Экономия топлива дизелем тепловоза ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем

Установка поршней с корундовым слоем в дизелях маневровых тепловозов позволяет снизить среднегодовой расход топлива на 30–40 %.

Влияние поршней с корундовым слоем на износ ЦПГ. В феврале 1993 г. во время проведения ТР-3 в дизель К6S310DR № 41103/752 выпуска ноября 1989 г. тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 были установлены опытные поршни с корундовым поверхностным слоем. Тепловоз прошел обкатку и реостатные испытания, которые показали соответствие всех рабочих характеристик техническим условиям. С марта 1993 г. тепловоз передан в маневровую работу с одновременным проведением эксплуатационных испытаний, по согласованию со службами «Укрзалізниці». При проведении текущих ремонтов в 1994, 1997, 1999, 2002 и 2005 гг. производились осмотры и замеры параметров ЦПГ дизеля. После наработки 93660 моточасов, в сентябре 2005 г., во время проведения ТР-3 дизель был разобран, детали ЦПГ были осмотрены и проведен микрометраж поршней с корундовым слоем [1, 2, 4]. Износ головки, кольцевых канавок и цилиндрической части поршней практически отсутствовал, а на днище поршней не было нагара. После наработки 114676 моточасов стал замечен незначительный износ корундового слоя на цилиндрической части поршня, а на цилиндрической части головки, кольцевых канавках и на днище появился нагар толщиной 50–80 мкм. Залегания колец не было. На всех поршнях виден корундовый слой на цилиндрической части поршня и постепенный рост толщины нагара со стороны пальцевого отверстия на поверхности без корундового слоя. Рабочая часть цилиндрической поверхности не имеет царапин и задиров. На рис. 9.25 (см. цветн. вклейку) приведены фотографии нового поршня с корундо-

вым слоем и того же поршня после 15-ти лет эксплуатации, работавшего в 1 цилиндре.

Во время проведения ТР-3 в декабре 2008 г. был произведен микрометриж цилиндрической поршневой группы. Результаты измерений поршней приведены в табл. 9.10. До наработки 93660 моточасов наиболее интенсивно изнашивались третий и пятый поршни, а износ первого, второго и шестого поршней происходил медленнее.

Таблица 9.10 – Результаты измерений поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 с поршнями с корундовым слоем

Расстояние от среза юбки, мм	Диаметр юбки поршня перпендикулярно оси пальца, мм		
	20.02.93 г. T=10 °C	29.09.05 г. T=20 °C	25.12.08 г. T=4 °C
Поршень № 0237 (№ 1)			
270	309,35	309,35	309,35
170	309,57	309,57	309,52
50	309,65	309,62	309,55
Поршень № 02862 (№ 2)			
270	309,46	309,46	309,43
170	309,56	309,56	309,53
50	309,65	309,60	309,55
Поршень № 1033 (№ 3)			
270	309,20	309,21	309,21
170	309,50	309,45	309,34
50	309,70	309,53	309,52
Поршень № 8010 (№ 4)			
270	309,20	309,41	309,20
170	309,60	309,56	309,57
50	309,65	309,60	309,60
Поршень № 5994 (№ 5)			
270	-	309,43	309,43
170	309,56	309,56	309,50
50	309,65	309,53	309,53
Поршень № 0287 (№ 6)			
270	-	309,35	309,35
170	309,60	309,57	309,52
50	309,65	309,62	309,57

После наработки 93660 моточасов начал происходить ускоренный износ первого, второго и третьего поршней (рис. 9.26).

Наибольший износ цилиндрической части имеют четвёртый и пятый поршни. Значение износа цилиндрической части 4-го поршня – около 120 мкм, а пятого поршня – 180 мкм.

Однако размеры цилиндрической части поршней опытного дизеля находятся в пределах допустимых значений. Размеры верхних кольцевых канавок поршней также находились в пределах допустимых значений (рис. 9.27).

После контрольного осмотра они были установлены в тот же дизель для дальнейшей маневровой работы.

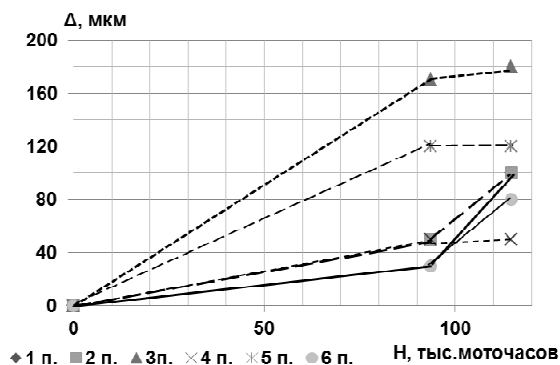


Рис. 9.26 – Зависимость величины износа цилиндрической части поршней от наработки до 114676 моточасов

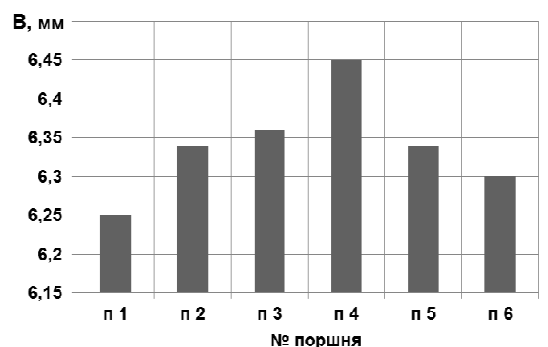


Рис. 9.27 – Износ верхних кольцевых канавок поршней дизелей тепловоза ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем после наработки 114676 моточасов

При проведении текущих ремонтов в 1994, 1997, 1999, 2002, 2005 и 2008 гг. производились осмотры и замеры диаметров гильз цилиндров дизеля. После наработки 93660 моточасов в сентябре 2005 г. и после наработки 114676 моточасов в декабре 2008 г. во время проведения ТР-3 дизель разбирался, проводился контрольный осмотр и микрометрирование гильз цилиндров.

Ниже контакта с компрессионным кольцом все гильзы имеют зеркальную поверхность без продольных царапин и видимого изнашивания. Микрометрирование гильз цилиндров, проведенный в 1993, 2005 и 2008 годах, показал, что износ гильз постепенно возрастает, однако находится в допустимых пределах.

До проведения ресурсных испытаний с опытными поршнями дизель тепловоза наработал 25524 моточаса, и гильзы в 5-м и 6-м цилиндрах были заменены новыми из-за большого износа. Размеры остальных гильз находились в пределах допуска. После этой наработки износ первой гильзы составил около 30 мкм, второй – до 50 мкм, третьей – до 10 мкм и четвертой – до 20 мкм. Контролируемые диаметры новых гильз в 5-м и 6-м цилиндрах были 310 и 310,01 мм соответственно (рис. 9.28).

После наработки 93660 моточасов износ гильз составил от 30 до 150 мкм. Наибольший износ был у гильз в 3-м, 5-м и 6-м цилиндрах. Диаметры гильз были в поле допуска и поэтому были установлены в дизель для дальнейшей работы.

Измерения контролируемых диаметров гильз в 2008 г. показали, что за промежуток времени с 2005 г. по 2008 г. дизель наработал 21 тыс. моточасов, а размеры контролируемых диаметров гильз не изменились. Только диаметр гильзы 4-го ци-

линдра изнашивался ещё на 20 мкм (рис. 9.30). Рабочие части гильз имели зеркальную поверхность без продольных царапин и следов износа.

По приведенным рисункам можно проследить изменение диаметров гильз в 1993 г. (рис. 9.29) и в 2008 г. (рис. 9.30).

В итоге за время наработки 114676 моточасов в 3-м, 5-м и 6-м цилиндрах был максимальный износ гильз, составивший 150 мкм. Величины износа гильз за время ресурсных испытаний на 25.12.2008 г. приведены на рис. 9.30.

После контрольного осмотра и микрометража после наработки 114878 моточасов все гильзы были установлены в дизель для продолжения ресурсных испытаний. Результаты измерений приведены в табл. 9.11. На основании результатов измерений построены графики изменения контрольных диаметров гильз по мере наработки начиная с 1993 г. (рис. 9.31).

Таблица 9.11 – Результаты измерений гильз дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6830 с поршнями с корундовым слоем.

Расстояние от верхнего среза гильзы, мм	Диаметр гильзы, мм					
	20.02.1993 г. T = 10 °C		29.09.2005 г. T = 20 °C		25.12.2008 г. T = 4 °C	
	перпендикулярно	параллельно	перпендикулярно	параллельно	перпендикулярно	параллельно
Гильза № 1						
85	310,09	310,03	310,15	310,06	310,06	310,15
400	310,05	310,05	310,05	310,06	310,06	310,05
700	310,03	310,05	310,03	310,06	310,05	310,05
Гильза № 2						
85	310,09	310,05	310,15	310,12	310,15	310,11
400	310,09	310,06	310,09	310,08	310,06	310,06
700	310,06	310,15	310,06	310,05	310,05	310,05
Гильза № 3						
85	310,01	310,03	310,14	310,12	310,10	310,14
400	310,08	310,05	310,08	310,05	310,08	310,06
700	310,04	310,04	310,04	310,05	310,04	310,04
Гильза № 4						
85	310,05	310,02	310,08	310,10	310,09	310,06
400	310,04	310,04	310,07	310,07	310,06	310,05
700	310,02	310,03	310,06	310,04	310,04	310,04
Гильза № 5						
85	310,00	310,01	310,11	310,08	310,11	310,06
400	310,05	310,01	310,08	310,06	310,02	310,05
700	310,02	310,01	310,03	310,06	310,04	310,04
Гильза № 6						
85	310,01	310,00	310,12	310,08	310,05	310,12
400	310,02	310,01	310,07	310,05	310,02	310,06
700	310,01	310,00	310,03	310,05	310,00	310,01

По результатам реостатных испытаний комиссия сделала вывод, что цилиндро-поршневая группа, оснащённая поршнями с корундовым слоем, после 15 лет эксплуатации обеспечивает технические характеристики дизеля в соответствии с техническими условиями при сохранении проектной мощности. На рис. 9.31 приведен износ гильз цилиндров дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем в процессе наработки.

В результате испытаний можно сделать следующие выводы:

1. До проведения исследований опытный дизель тепловоза отработал 23114 моточасов с ноября 1989 г. по февраль 1993 г.

2. При проведении ТР-3 в феврале 1993 г. в дизеле были заменены на новые гильзы в 5-м и 6-м цилиндрах и установлены опытные поршни с корундовым слоем во все 6 цилиндров.

3. За время ресурсных эксплуатационных испытаний дизель с опытными «корундовыми» поршнями отработал 114676 моточасов, и без замены деталей ЦПГ продолжается его дальнейшая эксплуатация.

С ноября 1989 г. по 13.10.2008 г. дизель с серийными поршнями наработал 137718 моточасов. За этот период в дизеле серийного тепловоза 3 раза производилась замена цилиндро-поршневых групп.

Оценка ресурса серийного дизеля началась с 1994 г., когда при проведении текущего ремонта ТР-2 в декабре 1994 г. в дизель были установлены все 6 новых комплектов деталей ЦПГ. К этому времени дизель наработал около 36232 моточаса. Контрольные наблюдения за деталями ЦПГ дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6835 осуществлялись в декабре 1995 г., в декабре 1999 г., в июле 2002 г., 2005 г. и в октябре 2008 г. В июле 2002 г. были заменены 3 группы деталей ЦПГ в 3, 4 и 6 цилиндрах. За время с декабря 1994 г. по июль 2002 г. дизель наработал 54974 моточаса. К проведению следующего капитального ремонта дизель наработал с июля 2002 г. по 13.10.2008 г. 46512 моточасов. В октябре 2008 г. дизель был разобран, проведен осмотр и микрометраж деталей ЦПГ.

При осмотре серийных поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6835 был установлен значительный износ цилиндрической части головки поршней, а износ верхних кольцевых канавок превышал допустимые значения. На днищах поршней образовался нагар толщиной до 1 мм и он начал отслаиваться (рис. 9.32, см. цветн. вклейку).

При попадании в зазор между гильзой и поршнем он вызвал износ цилиндрической части головки поршня (табл. 9.12), юбки поршня, поршневых колец и кольцевых канавок. На всех поршнях имелись задиры, износ канавок верхних по-

ршневых колец превысил допустимые размеры (рис. 9.33), и для дальнейшей эксплуатации поршни были непригодны и заменены новыми.

Таблица 9.12 – Результаты измерений поршней тепловоза ЧМЭ-3 с серийными поршнями после наработки 46512 моточасов

Расстояние от среза юбки, мм	Диаметр юбки поршня перпендикулярно оси пальца, мм					
	13.10.2008 г. T = 20 °С.					
	поршень № 1	поршень № 2	поршень № 3	поршень № 4	поршень № 5	поршень № 6
270	309,33	309,39	309,45	309,47	309,42	309,43
170	309,45	309,48	309,49	309,54	309,49	309,50
50	309,67	309,62	309,63	309,58	309,69	309,62

Рассмотрим изменение диаметров гильз в процессе наработки. Измерения диаметров гильз осуществлялось с декабря 1994 г. во время проведения текущих ремонтов. Примерно до 40 тыс. моточасов наработки износ гильз происходит одинаково во всех цилиндрах (рис. 9.34).

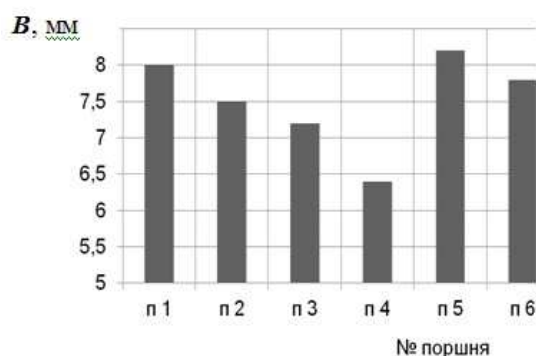


Рис. 9.33 – Размеры канавок верхних поршневых колец после наработки 46512 моточасов: В – ширина канавки, мм

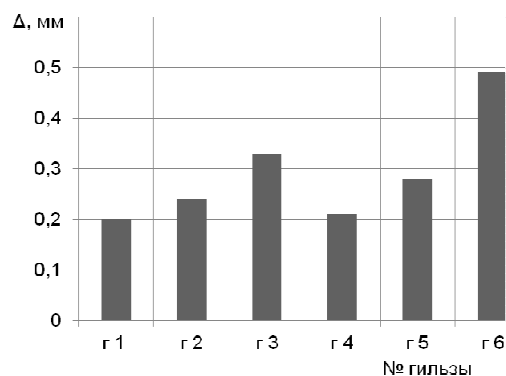


Рис. 9.34 – Износ гильз после наработки 54974 моточаса

В дальнейшем гильзы в 3-м и 6-м цилиндрах изнашиваются быстрее остальных, а в гильзе 4-го цилиндра появились глубокие царапины. Величины износа гильз после наработки 54974 моточаса до июля 2002 г. показаны на рис. 9.34. После проведения ТР-3 в июле 2002 г. и установки групп деталей новых ЦПГ в 3-й, 4-й и 6-й цилиндры дизель наработал 46512 моточасов. Результаты измерений диаметров гильз в июле 2002 г. и 13.10.2008 г. приведены в табл. 9.13.

По результатам измерений построены графики изменения диаметров гильз по мере наработки (рис. 9.35). Из графиков следует, что скорость износа новых гильз, установленных в 3-й, 4-й и 6-й цилиндры, гораздо больше скорости износа гильз, имеющих наработку с декабря 1994 г.

На рис. 9.36 приведен износ гильз серийного тепловоза за время работы дизеля с июля 2002 г. по 13.10.2008 г.

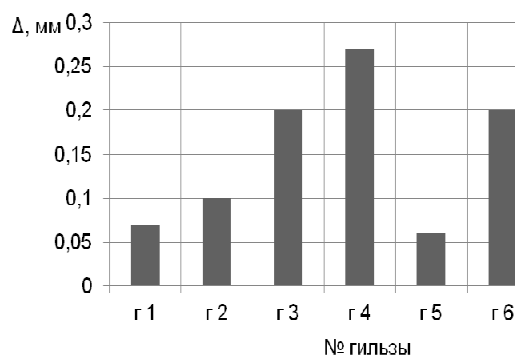


Рис. 9.35 – Величина износа гильз за время наработки 46512 моточасов с июля 2002 г. по 13.10.2008 г.

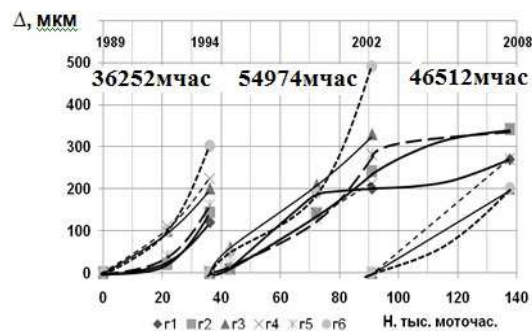


Рис. 9.36 – Износ гильз цилиндров дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с серийными поршнями в процессе наработки

Гильзы дизеля имели продольные царапины и значительный износ, признаны непригодными к дальнейшей эксплуатации и были заменены новыми.

Таблица 9.13 – Результаты измерений гильз дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с серийными поршнями

Расстояние от верхнего среза гильзы, мм	Диаметр гильзы, мм			
	07.2002г. T=20°C		13.10.2008г. T=15°C	
	перпендикулярно оси пальца	параллельно оси пальца	перпендикулярно оси пальца	параллельно оси пальца
Гильза № 1				
85	310,20	310,19	310,27	310,27
400	310,13	310,07	310,18	310,13
700	310,22	310,06	310,08	310,05
Гильза № 2				
85	310,26	310,11	310,36	310,3
400	310,28	310,09	310,19	310,09
700	310,11	310,07	310,08	310,06
Гильза № 3				
85	310,13	310,06	310,33	310,20
400	310,16	310,06	310,09	310,07
700	310,06	310,03	310,06	310,05
Гильза № 4				
85	310,05	310,07	310,32	310,15
400	310,09	310,09	310,04	310,03
700	310,08	310,09	310,08	310,05
Гильза № 5				
85	310,28	310,09	310,34	310,28
400	310,26	310,08	310,08	310,04
700	310,16	310,09	310,08	310,05
Гильза № 6				
85	310,02	310,03	310,22	310,13
400	310,02	310,00	310,06	310,05
700	310,01	310,06	310,07	310,03

Таким образом, можно сделать следующий вывод. В дизеле серийного тепловоза с ноября 1989 г. по 09.09.2008 г. 3 раза производилась замена

цилиндро-поршневых групп. Первая замена всех 6 комплектов ЦПГ была произведена после наработки примерно 36232 моточасов в декабре 1994 г. Вторая замена в 3-м, 4-м и 6-м цилиндрах произведена после наработки 54974 моточасов в июле 2002 г. Третья замена 6 комплектов деталей ЦПГ произведена в октябре 2008 г. после наработки 46512 моточасов. Ресурс ЦПГ серийного дизеля тепловоза ЧМЭ-3 находится в пределах 36–55 тыс. моточасов.

Сравнительные экспериментальные стендовые исследования дизеля 4ЧН12/14 проводились на моторном стенде для оценки влияния поршней с корундовым поверхностным слоем малой толщины, установленных в дизель, на индикаторные и эффективные показатели ДВС, которые влияют на эффективность использования теплоты сгорания и экономичность работы дизеля.

По нагрузочным характеристикам при $n = 2000, 1500$ и 1000 мин^{-1} , углах опережения впрыскивания топлива $\Theta_1 = 22$ гр. до ВМТ, $\Theta_2 = 18$ гр. до ВМТ, $\Theta_3 = 14$ гр. до ВМТ определялись: значение давления в цикле, индикаторные показатели, закон эффективного тепловыделения, скорость нарастания давления в цилиндре ($dp/d\phi$) в период сгорания в процессе топливоподачи, значение температуры в цикле и др. При снятии индикаторных диаграмм определялось 720 значений ординат давления, вырабатывалось усреднение по 124 рабочим циклам, интерполяция, сглаживание, определение значения абсолютного давления и в результате получали массив значений давления в цикле, индикаторные показатели, закон эффективного тепловыделения, скорость нарастания давления в цилиндре. Из индикаторных диаграмм двух режимов работы двигателя по внешней скоростной характеристике видно, что двигатель 4ЧН12/14, укомплектованный поршнями с корундовым слоем на всей поверхности, имеет значение максимального давления цикла $p_z = 10,75$ МПа при $\phi = 370,55$ гр. п.к.в. (рис. 9.37), а укомплектованный серийными поршнями – $p_z = 10,26$ МПа при $\phi = 369,45$ гр. п.к.в.

Частичная динамическая теплоизоляция путем применения поршней с корундовым теплоизолирующим слоем оказывает положительное влияние на показатели рабочего процесса. Это приводит к тому, что в процессе наполнения температура и давление в цилиндре немного меньше, чем при использовании серийных поршней. Из-за уменьшения трения корундовой боковой поверхности поршня о гильзу температура поршня немного снижается, это приводит к снижению температуры на поверхности доньшка поршня, что также вызывает некоторое улучшение коэффициента наполнения. Всё это приводит к улучшению коэффициента наполнения и к увеличению p_z , поэтому двигатель СМД 23, укомплектованный поршнями с корундовым

слоем ($\delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м), имеет более высокое значение максимального давления на всех режимах исследований.

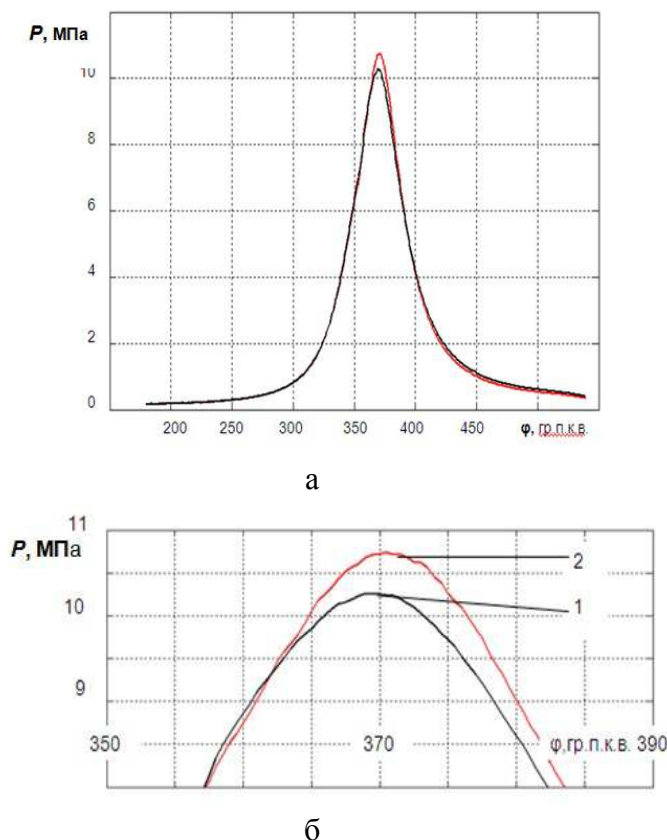


Рис. 9.37 – Индикаторная диаграмма дизеля 4ЧН12/14 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,95 \text{ МПа}$:
а – исходная; б – в увеличенном масштабе

1 – серийные поршни; 2 – поршни с корундовым слоем на всей поверхности;

Анализ индикаторной диаграммы на такте наполнения (рис. 9.38) позволяет сделать вывод об увеличении коэффициента наполнения, что подтверждает положительное влияние частичной динамической теплоизоляции поршня на рабочий процесс на этом такте. Период задержки самовоспламенения в КС с поршнем с корундовым слоем короче на 1,47 гр. п.к.в., а сам процесс самовоспламенения короче на 1,155 гр. п.к.в.

При использовании поршней с корундовым слоем отмечается уменьшение задержки самовоспламенения (более раннее самовоспламенение топлива) по сравнению со штатными поршнями на 1–2 гр. п.к.в. во всем диапазоне режимов работы. Скорость нарастания давления $(dp/d\varphi)_{\max}$ в период сгорания в процессе топливоподачи выше при использовании поршней с корундовым слоем практически во всем диапазоне режимов работы дизеля (рис. 9.39, 9.40), что объясняется увеличением скорости сгорания топлива.

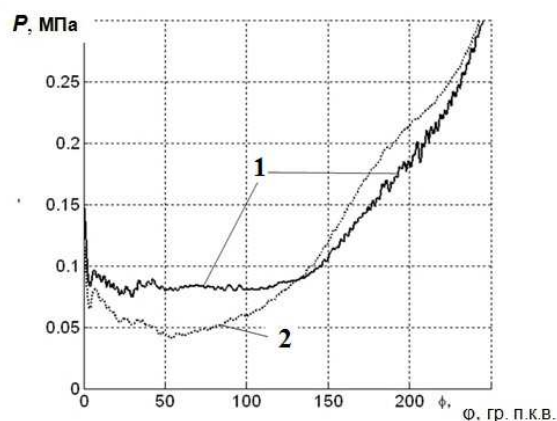


Рисунок 9.38 – Такт наполнения индикаторной диаграммы: 1 – серийные поршни; 2 – с корундовым слоем на всей поверхности

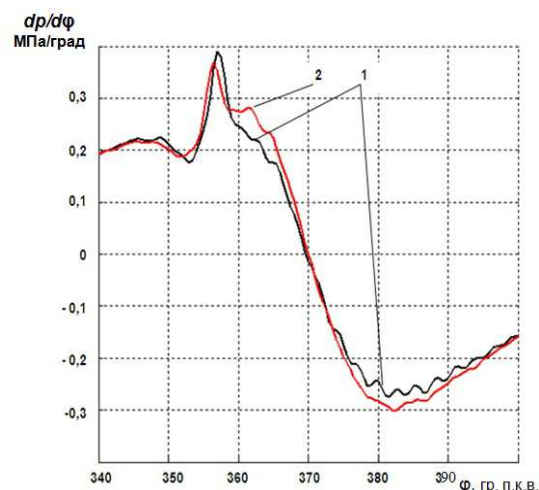


Рис. 9.39 – Скорость нарастания давления дизеля 4ЧН12/14 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,95 \text{ МПа}$: 1 – серийные поршни; 2 – с корундовым слоем на всей поверхности

Установка в двигатель поршней с корундовым слоем влияет на индикаторный процесс, а именно: скорость тепловыделения в первом периоде сгорания становится меньше, во втором периоде скорость сгорания становится максимальной, а сам процесс сгорания сдвигается в сторону ВМТ (см. рис. 9.41), становится более эффективным, и этим объясняется снижение удельного расхода топлива.

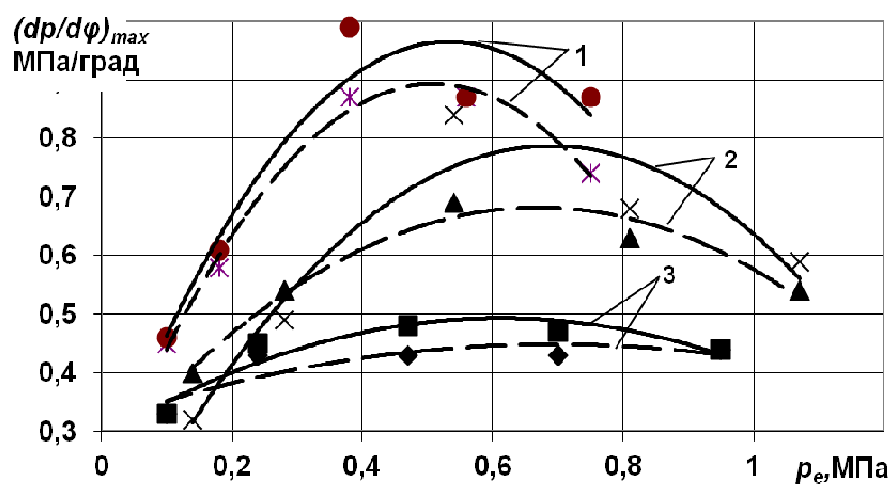


Рис. 9.40 – Максимальная скорость нарастания давления:
- - - - - серийные поршни; ————— опытные поршни;
1 – 1000 мин^{-1} ; 2 – 1500 мин^{-1} ; 3 – 2000 мин^{-1} .

В камере сгорания с серийными поршнями при первой вспышке (см. рис. 9.39) максимальное значение скорости сгорания составило $0,029 \text{ 1/град}$ при $\phi = 356,8 \text{ гр. п.к.в.}$, а в КС с поршнями с корундовым слоем процесс самовоспламенения начался чуть раньше, при меньшем количестве впрыснутого топлива, и поэтому максимальное значение скорости сгорания

составило 0,025 1/град при $\varphi = 356,1$ гр. п. к. в. Это обусловило более мягкую работу двигателя (см. рис. 9.41). Значение первого максимума скорости тепловыделения в КС с поршнями с корундовым слоем ниже из-за уменьшения продолжительности периода задержки самовоспламенения на 1,47 гр. п.к.в. и соответствующего количества впрыснутого топлива.

Значение скорости сгорания во время второго максимума составило 0,0416 1/град при $\varphi = 366,95$ гр. п.к.в., а для серийных поршней – 0,0384 1/град при $\varphi = 368,04$ гр. п.к.в.

Сопоставляя скорости тепловыделения при работе дизеля с серийными и опытными поршнями, видим, что скорость тепловыделения с опытными поршнями существенным образом ниже в области первого максимума $dx/d\varphi$ и значительно выше в области второго максимума. Увеличение максимального значения скорости сгорания в области второго максимума на 0,0032 1/град и приближение его к ВМТ на 1,086 гр. п.к.в. положительно влияет на эффективность использования теплоты сгорания и экономичность работы двигателя. Также следует отметить более раннее (на 10–20 гр. п.к.в.) окончание сгорания, которое особенно заметно на номинальном режиме работы двигателя.

В период сжатия температура заряда в КС с поршнем с корундовым слоем выше на 13–15 К по сравнению с серийной КС (рис. 9.42).

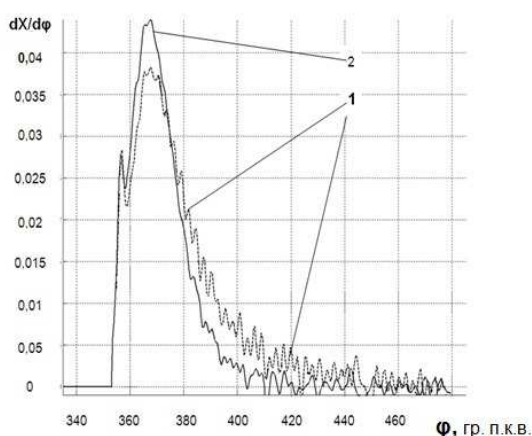


Рис. 9.41 – Скорость тепловыделения в цилиндре дизеля 4ЧН 12/14, оснащенного: 1 – серийными поршнями; 2 – поршнями с корундовым слоем

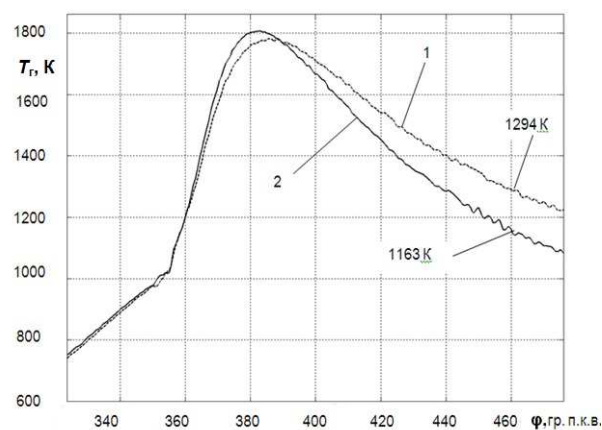


Рис. 9.42 – Температура газа:
1 – серийные поршни;
2 – опытные поршни, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$,
 $p_e = 0,95 \text{ МПа}$

Температура газа при устойчивом горении, приблизительно до $\varphi = 360$ гр. п.к.в., возрастает одинаково, а потом растет более интенсивно в КЗ с поршнем с корундовым слоем и достигает максимального значения 1811 К при $\varphi = 382,8$ гр. п.к.в.

В КС с серийным поршнем максимальное значение температуры газа 1790 К было достигнуто при $\varphi = 387$ гр. п.к.в. Максимальное значение температуры в КС с поршнем с корундовым слоем на 30,44 К выше и сдвинулось к ВМТ на 4,24 гр. п.к.в., что указывает на сокращение продолжительности третьей фазы сгорания. На линии расширения температура газа в КС с поршнем с корундовым слоем падает более круто. Так, при $\varphi = 440$ гр. п.к.в. она ниже на 109 К, при $\varphi = 460$ гр. п.к.в. – ниже на 131 К, а догорание заканчивается на 30 гр. п.к.в. раньше, чем в ДВС с серийным поршнем. Вследствие более раннего догорания температура выхлопных газов снижается почти на 10 %. Подтверждением положительного влияния частичной динамической теплоизоляции, образованной применением поршней с корундовым слоем малой толщины, может служить также отсутствие образования нагара в ДВС с такими поршнями. На рис. 9.43 (см. цветн. вклейку) показано, что при проведении сравнительных исследований на поршнях серийной конструкции образовался нагар (рис. 9.43, а), а на поршнях с корундовым слоем после испытаний нагар отсутствует (рис. 9.43, б).

Этот результат подобен тому, что было получено при сравнении ресурсных испытаний дизелей маневровых тепловозов.

Влияние угла опережения зажигания на индикаторный КПД дизеля 4ЧН12/14 с серийными поршнями и с поршнями с корундовым слоем толщиной $\delta=0,12$ мм и $\delta=0,240$ мм приведено на рис. 9.44.

Наибольшее значение индикаторного КПД дизеля получено для серийных поршней при $\varphi_{оп}=18$ гр. п.к.в., для поршней с корундовым слоем толщиной 0,12 мм и 0,24 мм при $\varphi_{оп}=19$ гр. п.к.в. При испытаниях дизеля с $\varphi_{оп}=18$ гр. п.к.в. было подтверждено, что толщина теплоизоляции доньшка поршня 0,12–0,14 мм позволяет получить лучшие результаты индикаторного КПД (рис. 9.45).

Из табл. 9.14 видно, что для получения одинаковой эффективной мощности двигателю с корундовыми поршнями требуется более низкое (на 3–7%) значение p_i .

Экспериментальные исследования двигателя 4ЧН12/14, укомплектованного опытными корундовыми поршнями, позволили установить:

1. В период сжатия температура заряда в КС с поршнем с корундовым слоем выше на 13–15 К по сравнению из серийной КС.
2. Период задержки самовоспламенения в КС с поршнем с корундовым слоем начался раньше на 0,577 гр. п.к.в. и был короче на 1,47 гр. п.к.в., чем в КС с серийным поршнем.

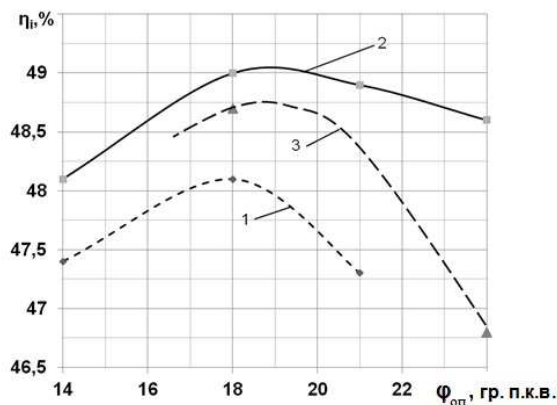


Рис. 9.44 – Индикаторный КПД дизеля 4ЧН12/14
 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,95 \text{ МПа}$:
 1 – серийные поршни; 2 – с корундовым слоем
 толщиной $\delta=0,12 \text{ мм}$; 3 – с корундовым слоем
 толщиной $\delta=0,240 \text{ мм}$

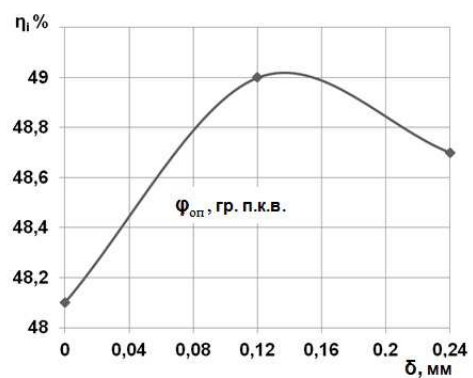


Рис. 9.45 – Индикаторный КПД ди-
 зеля 4ЧН12/14 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e =$
 $0,95 \text{ МПа}$ при $\phi_{оп}=18 \text{ гр.п.к.в.}$

Таблица 9.14 – Среднее индикаторное давление в цилиндрах

№ режима	$n, \text{мин}^{-1}$	$p_e, \text{МПа}$	$p_i, \text{МПа}$	
			штатный	опытный
1	2000	0,95	1,38	1,28
2		0,70	1,06	1,01
3		0,47	0,80	0,81
4		0,24	0,63	0,62
5		0,10	0,47	0,47
6	1500	1,07	1,29	1,24
7		0,81	1,02	0,99
8		0,54	0,76	0,71
9		0,28	0,49	0,49
10		0,14	0,42	0,38

3. Процесс самовоспламенения в КС с поршнем с корундовым слоем короче на 1,155 гр. п.к.в., чем в КС с серийным поршнем.

4. Из индикаторных диаграмм режимов работы двигателя по внешней скоростной характеристике двигатель с опытными поршнями имеет более высокое значение максимального давления.

5. Во всем диапазоне режимов работы дизеля максимальное давление цикла по нагрузочной характеристике выше при использовании опытных поршней.

6. Скорость нарастания давления $(dp/d\phi)_{\max}$ в период сгорания в процессе топливоподачи выше при использовании опытных поршней практически во всем диапазоне режимов работы дизеля.

7. Величина первого максимума скорости тепловыделения в КС с поршнями с корундовым слоем ниже на 0,0357 1/град и сдвинутая в сторону меньших углов п.к.в. от ВМТ, чем в КС с серийными поршнями из-за уменьшения продолжительности периода задержки самовоспламенения и количества впрыснутого топлива. Это обусловило более мягкую работу двигателя.

8. В КС с поршнем с корундовым слоем максимальное значение скорости сгорания в области второго максимума на 0,0032 1/град выше, чем в КС с серийным поршнем и ближе к ВМТ на 1,086 гр. п.к.в.

9. Сопоставляя скорости тепловыделения при работе дизеля с серийными и опытными поршнями, видим, что скорость тепловыделения в КС с опытными поршнями существенным образом ниже в области первого максимума dx/df и значительно выше в области второго максимума. Это влияет на эффективность использования теплоты сгорания и экономичность работы двигателя.

10. Максимальное значение температуры газа при устойчивом горении в КС с поршнем с корундовым слоем на 30,44 К выше и сдвинулось к ВМТ на 4,24 гр. п.к.в., что указывает на сокращение продолжительности третьей фазы сгорания

11. Более раннее окончание сгорания (на 10–20 гр. п.к.в.) особенно заметно на номинальном режиме работы двигателя.

12. На линии расширения температура газа в КС с корундовым поршнем падает более круто и она ниже на 100 – 130 К, догорание заканчивается на 30 гр. п.к.в. раньше, чем в КС с серийным поршнем.

13. Серийные поршни после испытаний имели нагар на головке толщиной от 20 до 160 мкм, а после испытаний двигателя с поршнями с корундовым слоем на головках поршней не было нагара. Более высокая температура корундовой поверхности доньшка поршня способствовала более полному сгоранию топлива и значительному снижению нагара.

14. Частично-динамическая теплоизоляция огневой поверхности поршня корундовым слоем толщиной $\delta \approx (0,12-0,16)$ мм позволила получить колебания температуры теплоизолированной поверхности поршня в пределах 60–80 °С вслед за изменением температуры газа. Это обеспечило снижение максимального значения удельного теплового потока в поршень на 16 % по сравнению с поршнем без теплоизоляции, что привело к таким последствиям: снижению потерь тепла, снижению температуры поверхности корундового слоя поршня на 8 °С в процессе наполнения по сравнению с температурой серийного поршня, увеличению максимального размаха тем-

пературной волны на 60 °С, уменьшению максимума скорости тепловыделения при самовоспламенении на 12,5 %.

15. В период диффузионного сгорания температура газа в КС увеличивается примерно на 30 К, а на корундовой поверхности поршня – примерно на 60 К, что позволяет получить плазму с повышенной концентрацией ионизирующего воздействия. Избыточный заряд газа в основном положительный, а избыточный заряд корундоэлектрета отрицательный. Притяжение молекул газа к корундовой поверхности усиливается, их скорость многократно увеличивается, что приводит к усилению удара молекул о корундовую поверхность и разрушению самой молекулы. Происходит разрушение крупных молекул на мелкие фрагменты. Уменьшается энергия активации начала цепной реакции распада молекул, что приводит к:

- увеличению максимального давления цикла на 0,5 МПа;
- увеличению максимальной скорости тепловыделения во время второй вспышки на 8,35 %;
- более раннему (на 10–20 гр. п. к. в.) окончанию сгорания;
- снижению механических потерь на 60 % от суммарных механических потерь.

Это и вызывает повышение эффективности работы ДВС. Мощность двигателя возрастает и соответственно уменьшается расход топлива.

Выполнено измерение массовых выбросов твёрдых частиц (ТЧ) с отработавшими газами (ОГ) дизеля 4ЧН12/14 при исследованиях дизеля с серийными поршнями (1-й вариант) и дизеля с поршнями с корундовым слоем с толщиной корундового слоя $\delta_{\text{п}} = 0,12$ мм (2-й вариант) и с $\delta_{\text{п}} = 0,24$ мм (3-й вариант) (рис. 9.46).

По результатам исследований определены значения абсолютных и относительных среднеквадратичных отклонений (СКО) (табл. 9.15), [9].

Таблица 9.15 – Результаты значений СКО

Варианты исследований	СКО	
	абс, г/ч	отн, %
1	2,02	11,3
2	2,22	12,4
3	1,84	10,3

В результате использования поршней с корундовым слоем выбросы твердых частиц (ТЧ) снижаются. Значения PT_m уменьшились в среднем:

- при $n = 1000$, мин⁻¹: на 25 % при $\Delta_{\text{п}} = 0,12$ мм и на 28 % при $\delta_{\text{п}} = 0,24$ мм;
- при $n = 1500$ мин⁻¹: на 12% при $\Delta_{\text{п}} = 0,12$ мм и на 21 % при $\delta_{\text{п}} = 0,24$ мм;
- при $n = 2000$ мин⁻¹: на 2 % при $\Delta_{\text{п}} = 0,12$ мм и на 12 % при $\delta_{\text{п}} = 0,24$ мм.

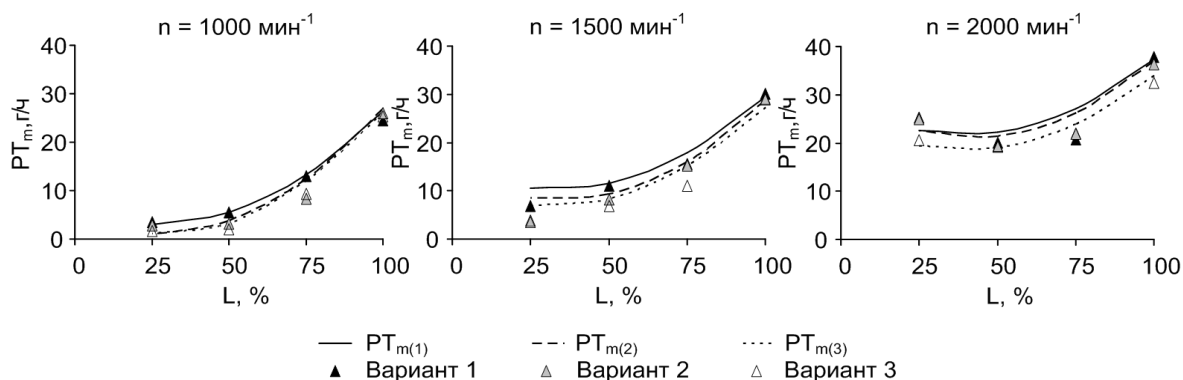


Рис. 9.46 – Экспериментальные данные и аппроксимирующие зависимости, полученные при исследовании дизеля 4ЧН12/14 с различной толщиной корундового слоя: вариант 1 – без корундового слоя; вариант 2 – $\delta_{\text{п}} = 0,12$ мм; вариант 3 – $\delta_{\text{п}} = 0,24$ мм

С увеличением нагрузки от 25 до 100 % значения относительных отклонений $\delta PT_{m(2)}$ и $\delta PT_{m(3)}$ уменьшаются на всех уровнях варьирования числа оборотов (за исключением диапазона $L = 25 \dots 50$ % при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$) (рис. 9.47).

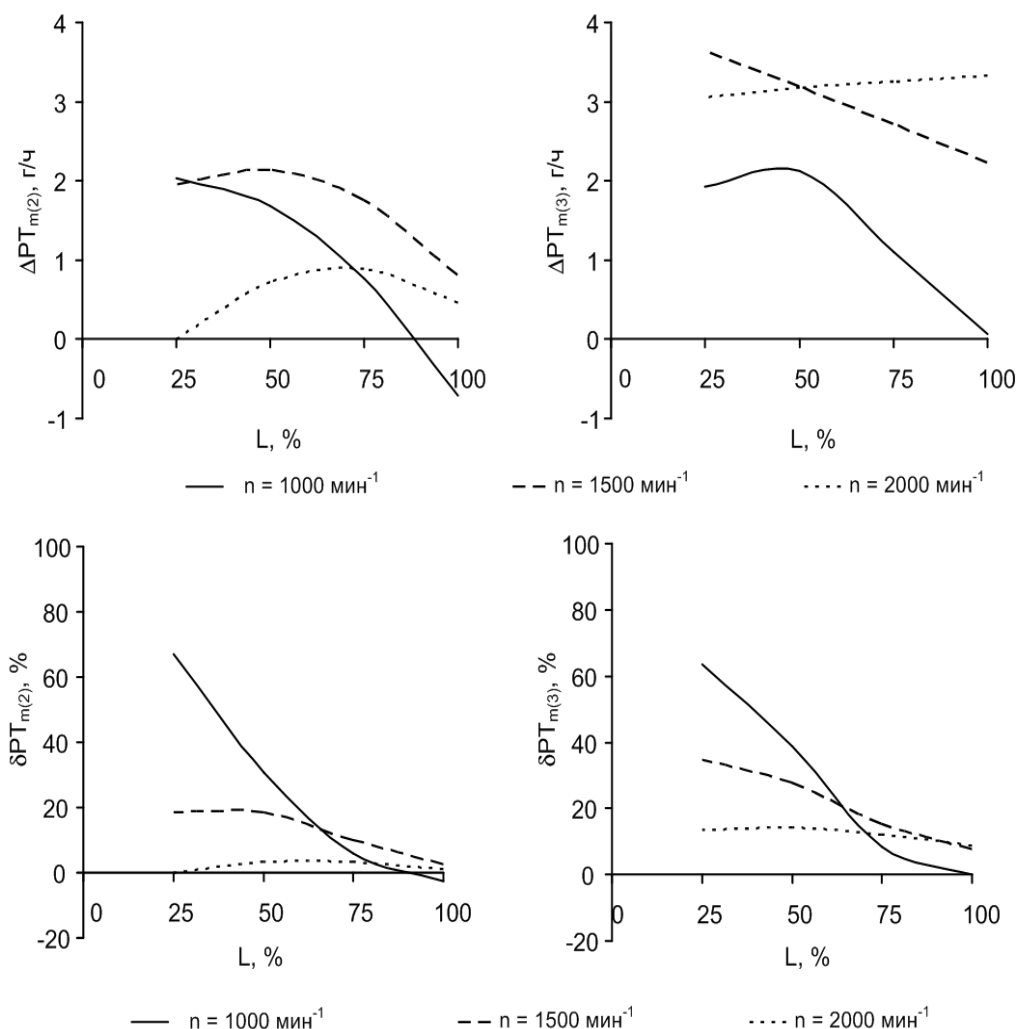


Рис. 9.47 – Абсолютные и относительные изменения массовых выбросов ТЧ в результате использования поршней с корундовым слоем

Применение поршней с корундовым слоем на днище поршня, поверхности КС в поршне и боковой поверхности поршня до 1-го компрессионного ко-

льца автотракторного дизеля 4ЧН12/14 приводит к снижению массовых выбросов ТЧ с ОГ в среднем на 19 % при $\delta_n = 0,12$ мм и на 30 % при $\delta_n = 0,24$ мм, позволяет уменьшить среднеэксплуатационные удельные выбросы ТЧ дизеля: при испытаниях его по 13-ступенчатому циклу R-49-02 – на 7,8 % при $\delta_n = 0,12$ мм и на 16,8 % при $\delta_n = 0,24$ мм; при испытаниях его по 8-ступенчатому циклу R-96 – на 5,6 % при $\delta_n = 0,12$ мм и на 12,1 % при $\delta_n = 0,24$ мм.

Таким образом, установлено, что применение поршней с корундовым слоем приводит к снижению массового выброса твёрдых частиц с отработавшими газами дизеля на 19 – 30 %.

Испытания дизеля Д-240Л проводились на обкаточно-тормозном стенде для 2-х вариантов поршней. Исходный вариант – это поршни, полученные от завода-изготовителя. Они прошли микрометраж и 30-ти часовое обкатывание на дизеле. Опытный вариант – поршни с корундовым поверхностным слоем на всей внешней поверхности, толщиной до 0,2 мм, которые прошли микрометраж и обкатывание 30 часов. Испытание дизеля проводилось путем снятия регулировочных характеристик. В результате испытаний двигателя с опытными поршнями установлено, что оснащение двигателя поршнями с корундовым слоем обусловило повышение максимальной мощности двигателя на 8,66 % и снижение удельного расхода топлива на 6,58 %, температуры охлаждающей воды и масла на 15 °С. С 15.03.1999 г. двигатель установлен на тракторе «Беларусь» и передан в КСП «Маяк» с. Революционное Волчанского района Харьковской обл. для проведения полевых ресурсных испытаний. За период полевых ресурсных испытаний с 15.03.1999 г. по март 2003 г. цилиндро-поршневая группа не заменялась, а двигатель с поршнями с корундовым слоем отработал больше 15 тыс. моточасов и вышел из строя в результате обрыва клапана. За весь период эксплуатации расход топлива и масла был ниже норм, установленных для новых двигателей. Микрометраж деталей показал, что размеры деталей цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунных механизмов остались без изменений.

Результаты кратковременных стендовых испытаний дизеля с серийными и поршнями с корундовым слоем приведены в табл. 9.16.

Аналогичные экспериментальные исследования проводились на серийном дизеле Д65НТ1, обкатанном на протяжении 8 часов и установленном на новом тракторе ПМЗ 6АКЛ для 2 вариантов поршней: исходный вариант – серийные поршни; исследовательский вариант – поршни с корундовым поверхностным слоем на всей внешней поверхности и тефлоновым защитным покрытием на цилиндрической поверхности.

Таблица 9.16 – Результаты испытаний дизеля Д240Л

Параметры дизеля	Единицы измерений	Характеристики дизеля	
		серийные поршни	поршни с корундовым слоем
Крутящий момент	кГм	36,6	36,6
Частота вращения коленчатого вала	мин ⁻¹	2200	2237
Часовой расход топлива	л/ч	14,27	14,5
Удельный расход топлива	г/(кВт ч)	258	241
Мощность	кВт	55	60
Температура воды на выходе	°С	90	75
Температура масла в картере	°С	85	70
Температура воздуха	°С	10	10
Температура топлива	°С	4	4

Обкатывание двигателя осуществлялось в течение 30 часов при атмосферном давлении 745 мм рт. ст. с использованием масла МГ10М2 и топлива ДТ. Результаты кратковременных стендовых испытаний, проведенных для сравнения показателей дизеля Д65НТ1 с серийными и поршнями с корундовым поверхностным слоем и тефлоновым покрытием приведены в табл. 9.17. В результате стендовых испытаний двигателя Д65НТ1, оснащенного поршнями с корундовым слоем и тефлоновым покрытием поверхностей трения, установлено:

1. Повышение развиваемой мощности на 4,4 % обусловлено снижением суммарных механических потерь на внутреннее трение.
2. Снижение расхода топлива на 5,1 %. обусловлено улучшением процесса сгорания топлива и увеличением индикаторного КПД.
3. Уменьшение дымности выхлопных газов с 46 до 30 %.
4. Температура воды на выходе снизилась с 85 до 80 °С.

Испытание дизеля ЯМЗ-236 с поршнями с корундовым слоем на всей внешней поверхности проводилось на протяжении 1998 г. на автомобиле Урал-357ПЯ. Толщина корундового слоя неравномерная, а пропорциональна тепловой и силовой нагрузкам, действующим на поршень, и составляла 0,1-0,3 мм. Автомобиль заправлялся дизельным горючим на стационарных заправках. За время пробега 10000 км замена масла не проводилась и масло не доливалось. Температура в системе охлаждения дизеля была ниже на 10–15 °С. Применение поршней с корундовым слоем обеспечило снижение расхода топлива на 8 % относительно «Норм расхода горючего и смазочных материалов», утвержденных Министерством транспорта Украины в 1995 г.

Таблица 9.17 – Результаты стендовых испытаний дизеля Д65НТ1

Параметры дизеля	Едини- цы из- мерений	Характеристики дизеля	
		серийные поршни	поршни с корун- довым слоем и те- флоновым покры- тием
Крутящий момент	кГм	235	237
Частота вращения коленчатого вала	мин ⁻¹	1750	1751
Часовой расход топлива	л/ч	12,4	11,8
Удельный расход топлива (оцененный)	г/(кВт ч)	263,8	259,7
Мощность (эксплуатационная)	кВт	44,7	46,7
Температура воды на выходе	°С	85	80
Температура выхлопного газа на выходе	°С	525	568
Температура воздуха	°С	-20	-20
Дымность	%	46	30

Стендовые испытания двигателя МеМз-245 с поршнями с корундовым слоем. В экспериментальных исследованиях влияния теплоизоляции поршней двигателя МеМз-245 были использованы поршни, которые прошли гальвано-плазменную обработку огневого днища и кольцевого пояса поршня, на внешней поверхности которых образован корундовый слой толщиной до 0,3 мм.

Исследования проводились на Мелитопольском моторном заводе в лаборатории испытания двигателей экспериментального цеха на тормозной установке с динамометром постоянного тока при участии А. И. Беседина, А. Ф. Реппих и Ю. Г. Оганова. На рис. 9.47 видно, что крутящий момент у двигателя с поршнями с корундовым слоем немного выше, чем у двигателя с серийными поршнями во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала. Так, при $n = 1500$ мин⁻¹ он выше на 7 %, а при $n = 3000$ и 4500 мин⁻¹ – на 2 %.

Как видно из рис. 9.48 – 9.51, применение поршней с корундовым поверхностным слоем позволяет снизить расход топлива во всем диапазоне скоростной характеристики от 1,7 % до 10 %, повысить эффективную мощность двигателя и его крутящий момент (M_k) за счет влияния теплоизоляции поршня на процесс сгорания топлива.

Для частоты вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹ снижение удельного расхода топлива происходит во всем диапазоне нагрузок и составляет от 0 до 4,6 %.

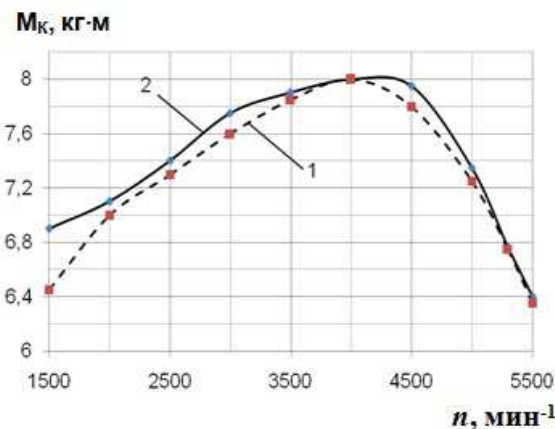


Рис. 9.48 – Изменение M_k двигателя МеМз-245 при использовании поршней с корундовым слоем; 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

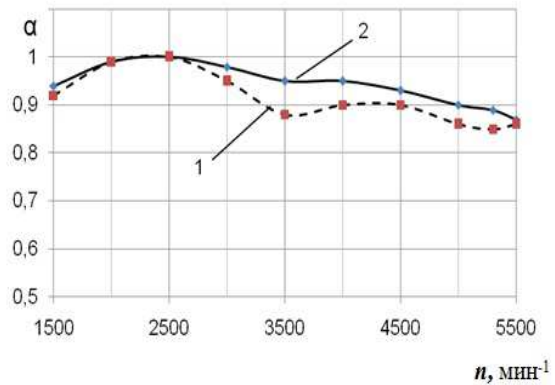


Рисунок 9.49 – Изменение коэффициента избытка воздуха двигателя МеМз-245 при использовании поршней с корундовым слоем; 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

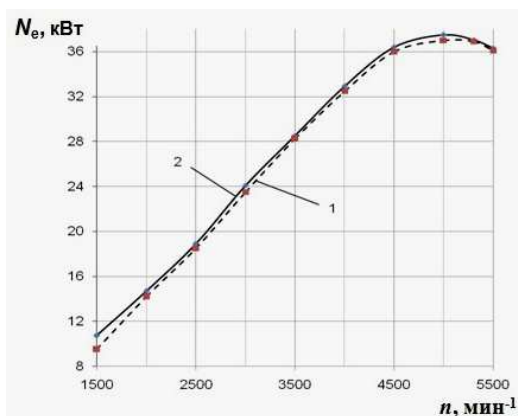


Рис. 9.50 – Изменение эффективной мощности двигателя МеМз-245 при использовании поршней с корундовым слоем; 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

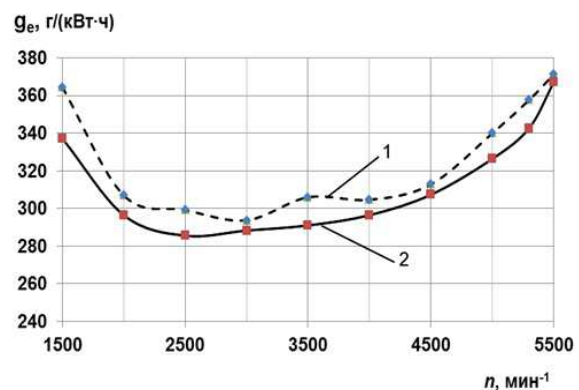


Рис. 9.51 – Изменение удельного расхода топлива двигателя МеМз-245: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

Оценка влияния теплоизолирующего корундового слоя на экономические показатели проводилась сравнением нагрузочных характеристик для серийной и опытной комплектации двигателя при частотах вращения коленчатого вала 1500 мин^{-1} (рис. 9.52, 9.53) и 3000 мин^{-1} (рис. 9.54, 9.55).

В результате испытаний установлено, что двигатель, укомплектованный поршнями с корундовым поверхностным слоем, имеет более низкий расход топлива. Так, для частоты вращения коленчатого вала 3000 мин^{-1} снижение удельного расхода топлива во всем диапазоне нагрузок составляет от 1,7 до 8,3 %.

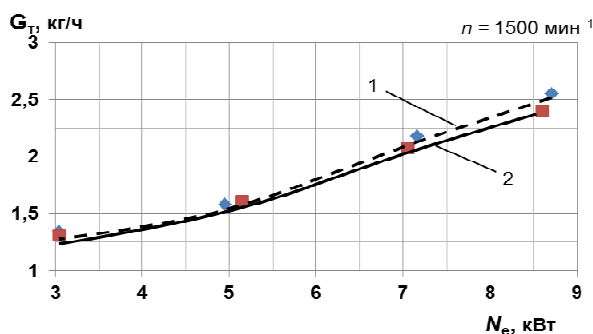


Рис. 9.52 – Изменение часового расхода топлива двигателя МеМз-245 в зависимости от нагрузки при использовании поршней с корундовым слоем:
1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

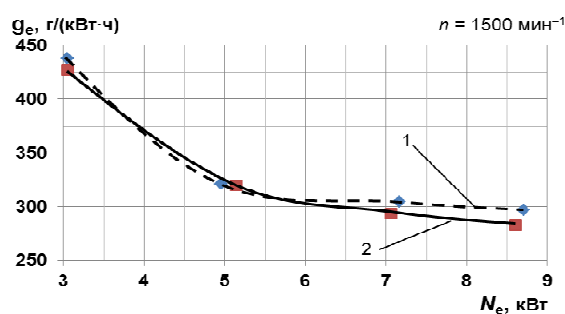


Рис. 9.53 – Зависимость удельного расхода топлива двигателя МеМз-245 от нагрузки: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

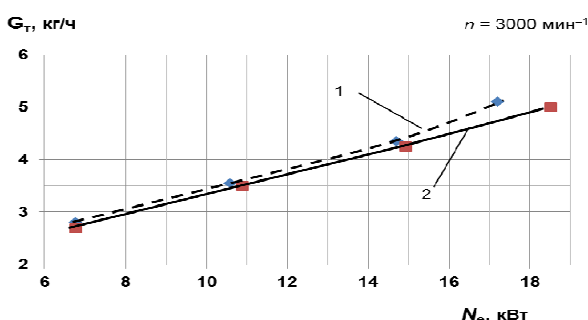


Рис. 9.54 – Изменение часового расхода топлива двигателя МеМз – 245 в зависимости от нагрузки при использовании поршней с корундовым слоем: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

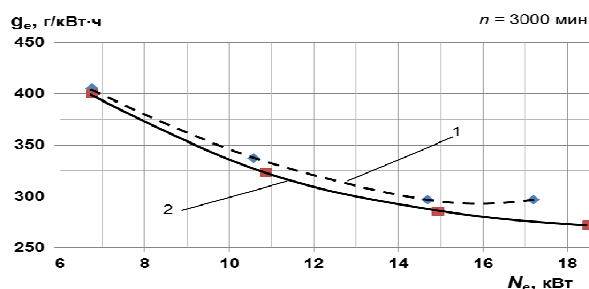


Рис. 9.55 – Зависимость удельного расхода топлива двигателя МеМз-245 от нагрузки: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

При определении регулировочной характеристики по расходу топлива на холостом ходу при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ установлено снижение расхода топлива на 10 %. На рис. 9.56 – 9.57 приведены графики регулировочной характеристики холостого хода по составу смеси.

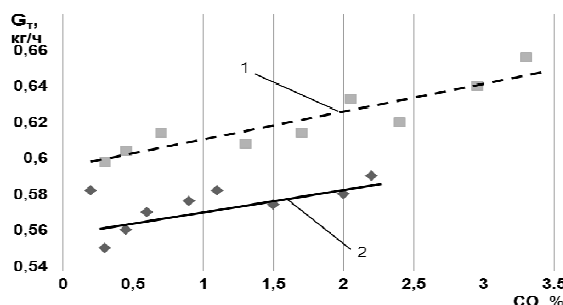


Рис. 9.56 – Регулировочная характеристика холостого хода по составу смеси двигателя МеМз-245: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

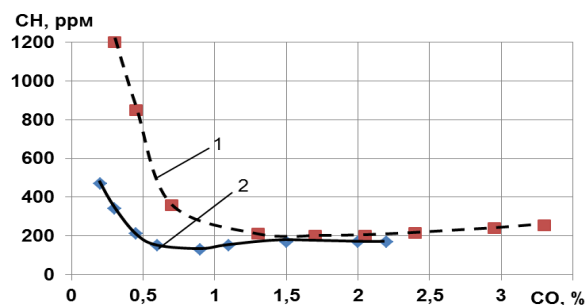


Рис. 9.57 – Изменение содержания СН при изменении содержания СО в отработанных газах двигателя МеМз-245 на режиме холостого хода: 1 – серийные поршни; 2 – опытные поршни

При изменении содержания СО в отработанных газах происходит и изменение содержания СН. Однако для двигателя с поршнями с корундовым слоем содержание СН значительно ниже. Для серийной комплектации содержание СН составляет 200–1200 ppm, а для двигателя с поршнями с корундовым слоем – 170–460 ppm.

Улучшение технико-экономических показателей двигателя происходит во всем диапазоне нагрузок и особенно это заметно на частичных режимах, а именно эти режимы работы двигателя являются наиболее весомыми при оценке экономичности силовой установки транспортных средств.

В результате испытаний двигателя МеМз-245 установлено:

1. Теплозащитный корундовый слой на поршне двигателя уменьшает теплоотвод через поршень, позволяет лучше использовать тепло для организации процесса сгорания и повышения экономических показателей двигателя.

2. Использование поршней с корундовым поверхностным слоем толщиной 0,15–0,2 мм на донышке поршня и кольцевом поясе приводит к умеренному повышению температуры поверхностного корундового слоя, который сопровождается улучшением экономичности двигателя МеМз на частичных нагрузках на 1,7–8,3 %, и значительному снижению содержания углеводородов в отработанных газах.

3. На режиме холостого хода снижение затраты топлива составляет 10 %, также происходит снижение содержания СН в отработанных газах, особенно в области бедных смесей.

4. Для достижения лучших экономических и токсичных показателей двигателя МеМз такие поршни могут быть использованы для обычных серийных модификаций.

5. Улучшение технико-экономических показателей двигателя происходит во всем диапазоне нагрузок, и особенно это заметно на частичных режимах, а именно эти режимы работы двигателя являются наиболее весомыми при оценке экономичности силовой установки транспортных средств.

9.4. Оценка влияния теплоизоляции камеры сгорания на рабочий процесс, расход топлива и ресурс ДВС

Нанесение теплозащитных покрытий на рабочую поверхность поршня показало их высокую эффективность.

Экспериментальные исследования дизелей, оснащенных поршнями с керамическим покрытием, продемонстрировали снижение эффективного расхода топлива (g_e) и повышение мощности. Так на дизелях:

- 1Ч 18/22 снижение g_e составило 7–9 г/(кВт·ч);
- 1ЧН18/20 на 2,7 г/(кВт·ч);
- 2ЧН21/21 на 5,44 г/(кВт·ч);
- 1Ч 24/36 на 2,5–13 г/(кВт·ч);
- 1ЧН 25/34 на 5–8 г/(кВт·ч);
- Д20 на 3–10 г/(кВт·ч).

Однако несмотря на преимущества теплоизолирующих покрытий, они не нашли практического применения в двигателях внутреннего сгорания из-за малой адгезионной прочности и термостойкости. Керамические покрытия на алюминиевых поршнях подвержены значительным растягивающим нагрузкам и имеют малую надёжность, происходит отслаивание покрытия от огневой поверхности поршня и остановка двигателя.

Частичная теплоизоляция КС с низкотеплопроводными накладками привела к усложнению конструкции деталей КС и ухудшению эффективности работы двигателей.

Попытки создания адиабатных двигателей потерпели неудачу. Практическая реализация «адиабатного» двигателя путем применения массивных жаровых накладок не привела к снижению расхода топлива. Повышение температуры стенок КЗ до 500–700 °С ухудшило показатели рабочего процесса дизелей.

Решение проблемы было достигнуто частичной теплоизоляцией КС ДВС – установкой поршней с оптимальными параметрами керамического корундового слоя. Улучшение показателей топливной экономичности ДВС, повышение ресурсной безотказности двигателей происходит за счёт применения перспективной технологии гальвано-плазменной обработки поршней.

Позитивное влияние малой толщины теплозащитного корундового слоя на поверхности поршня на улучшение характеристик ДВС теоретически обосновано. Усовершенствован метод микродугового оксидирования (МДО), в части значительного увеличения плотности тока оксидирования без срыва микроплазменного процесса в дуговой, который отличается от известного ранее скоростью процесса и получением керамического «корундового» слоя с высокой адгезией к основному металлу. Определены режимы получения керамического слоя, преимущественно фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – корундовой керамики. Впервые обоснована, разработана и внедрена прогрессивная технология гальвано-плазменной обработки поршней из алюминиевых сплавов с получением слоя корундовой керамики.

Внедрение усовершенствованного технологического процесса гальвано-плазменной обработки поршней из алюминиевых сплавов и установление рациональной толщины корундового поверхностного слоя дало возможность при применении поршней с корундовым слоем улучшить топливную экономичность, улучшить условия запуска двигателя, снизить: потери тепла в окружающую среду, требования к сорту топлива, жесткость работы двигателя, температуру тела поршня, повысить индикаторный КПД и увеличить ресурс цилиндра-поршневой группы более чем в 3 раза.

Экспериментальные и промышленные испытания двигателей, оснащенных поршнями с корундовым поверхностным слоем продемонстрировали снижение эффективного расхода топлива и повышение мощности на дизелях:

- Д-240Л снижение g_e составило 6,6 %, увеличилась максимальная мощность на 8,66 %;

- Д65НТ1 на 5,1 %, увеличилась развиваемая мощность на 4,4 %.

На двигателе МеМЗ-245 снижение g_e составило до 10 %; на двухтактном двигателе снижение g_e составило 3,2 %, на 6 % увеличилась максимальная мощность.

Предложенное решение научной проблемы позволило на обоснованной научной основе получить качественно новые возможности использования двигателей внутреннего сгорания, практически реализовать повышение качества как при изготовлении, так и при ремонте двигателей любого назначения. Даны рекомендации по применению разработанной технологии образования корундового слоя. Создана полупромышленная установка гальвано-плазменной обработки для ряда типоразмеров поршней дизелей. Разработаны конструкции и изготовлены специальные катоды для гальвано-плазменной обработки отдельно днища поршня, головки и зоны поршневых колец, цилиндрической части и для обработки всей наружной поверхности поршня. Проведены моторные, стендовые, полевые ресурсные, ресурсные эксплуатационные и промышленные реостатные испытания двигателей с корундовыми поршнями для проверки адекватности математической модели.

Достоверность научных положений, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и подтверждаются экспериментальными исследованиями: двигателя МеМЗ-245, дизеля трактора ЮМЗ – Д65НТ1, практикой опытной эксплуатации и ресурсных исследований двигателя К6S310DR с корундовыми поршнями маневрового тепловоза ЧМЭ-3, полевыми ресурсными испытаниями двигателя Д240Л трактора «Беларусь», ресурсными ис-

следованиями дизеля ЯМЗ-236 автомобиля «Урал», двигателя «Audi» V1800 спортивного автомобиля «Ска-багги», картингового двигателя ЧЗ-516 (иллюстрации – на рис. 9.58, см. цвет. вклейку) и не противоречат известным положениям технических и фундаментальных наук, базируются на строго доказанных выводах, предложенных авторами ранних исследований.

Разработаны и после экспериментальной и производственной проверки утверждены в Украине технические условия на поршни с корундовым слоем для ДВС.

9.5. Внедрение разработок на объектах военной и гражданской техники

В ходе проведения научно-исследовательских работ созданы и внедрены следующие разработки, кроме описанных выше технологий упрочнения элементов тепловозных и автомобильных двигателей. Работы выполнены НТУ «ХПИ», фирмой «ТАВИ», НТУ, ХНАДУ, ГП «Завод им. Малышева» на многих предприятиях.

1. Упрочнение элементов двигателей типа КамАЗ-740 для шасси установок «Град» и других бронированных и небронированных военных машин.

Внедрение: на объектах БМ-21 «Град» (многостволовая реактивная установка (см. рис. 9.1); бронетранспортер 43269, машины боевой группы «Мустанг» КАМАЗ-4350 (4х4), КамАЗ-5350 (6х6), КамАЗ-4320 (4х4); БАЗ-6950 «Основа 1», БАЗ 69501 «Лавина» (8х8), БАЗ-6944, БАЗ-5947 (6х6) (см. рис. 9.58 на цветн. вклейке), а также другие машины, в том числе для миротворческих сил Украины.

2. Упрочнение осей колесных пар тележек трамваев и якорей приводных электродвигателей.

Предприятия: Коммунальное предприятие «Вагоноремонтный завод», Изюмский тепловозоремонтный завод (рис. 9.59, см. цветн. вклейку).

Внедрение: трамвайные вагоны ТАЗ-ОНА, троллейбусы ЗиУ-9, локомотивы 2ТЭ10, 2ТЭ116, колесные пары подвижного состава городского и железнодорожного транспорта.

3. Упрочнение прокатных валков для горячего деформирования черного металла.

4. Упрочнение шпиндельных узлов крупногабаритных станков.

Внедрение: детали шпиндельной группы станков моделей 9А350Ф1 и 9А340.

5. Упрочнение стволов артиллерийских систем.

6. Модификация поверхности боеприпасов.

7. Исследование влияния холодной пластической деформации и термической обработки на структуру и свойства рессорно-пружинной стали 45ХН2МФАШ для деталей привода нагнетателя форсированного двигателя внутреннего сгорания.

Внедрение: детали форсированных двигателей (рис. 9.60, см. цветн. вклейку) 11ГД100М, 10Д100М1, 4Д80Б, 1Д80Б, 15Д100.

8. Повышение долговечности валиков переключения передач трактора.

Внедрение: детали трансмиссий тракторов.

9. Исследования механических свойств и триботехнических характеристик вкладышей подшипников скольжения производства Запорожского машиностроительного завода для двигателя 5Д49.

Внедрение: детали двигателя 5Д49.

10. Исследование влияния различных методов обработки поверхности на долговечность стальных изделий.

Внедрение: детали двигателей.

11. Повышение триботехнических свойств элементов машиностроительных конструкций (рис. 9.61–9.63, см. цветн. вклейку) с использованием технологии корундирования (предприятия различных отраслей промышленности).

Результаты исследований нашли свое внедрение в ходе выполнения ряда бюджетных фундаментальных и прикладных НИР по тематическим планам Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Национального транспортного университета и Харьковского национального автомобильного университета.

Литература к разделу 9

1. Шпаковский В.В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндропоршневой группы / В.В. Шпаковский, В.В. Осейчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 101–105.

2. Шпаковский В.В. Повышение ресурса цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля образованием корундового слоя на поверхности поршней / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов и др. // Локомотив информ. – 2007. – № 1. – С. 28–30.

3. Шпаковский В.В. Изменение скоростных характеристик дизелей маневровых тепловозов в процессе длительной эксплуатации /

В.В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 1. – С. 110-112.

4. Шпаковский В.В. Исследования износа гильз цилиндров при ресурсных испытаниях дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с «корундовыми» поршнями / В.В. Шпаковский // Сборник науч. тр. Укр. государств. академии железнодорожного транспорта. – 2009. – Вып. 107. – С. 40–45.

5. Ермаков В.Ф. Оптимизация тепловых сопротивлений деталей цилиндров судовых дизелей / В.Ф.Ермаков // Двигателестроение. – 1979. – № 3. – С. 22–23.

6. Ерощенко С.А. Оценка экономичности работы тепловоза при реостатных испытаниях / С.А. Ерощенко, В.В. Савенко, А.В. Панчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – №2 – С. 87–90.

7. Шпаковский В.В. Оснащение дизелей маневровых тепловозов поршнями с корундовым слоем для повышения эффективной мощности после текущего ремонта / В.В. Шпаковский // Сборник науч. тр. Укр. Государств. академии железнодорожного транспорта. – 2009. – Вып. 108 – С. 56–60.

8. Шпаковский В.В. Результаты реостатных испытаний дизелей с поршнями, прошедшими гальваноплазменную обработку поверхности / В.В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2 – С. 115–116.

9. Парсаданов И.В. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня на выбросы твёрдых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – № 2. – 2009. – С. 97–100.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных *фундаментальных и прикладных* исследований в работе впервые научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения ресурса тяжело нагруженных элементов форсированных двигателей и других деталей машиностроительных изделий методами дискретного упрочнения, корундирования, модифицирования поверхностных слоев и ионной бомбардировки. Способы обеспечивают *более высокий, по сравнению с известными способами упрочнения, уровень износостойкости и прочности* с одновременным увеличением задиростойкости и уменьшением *износа при экологичности процесса*. При этом в 5–8 раз уменьшается *время и стоимость* технологических операций упрочнения. Граница между упрочненным слоем и основным металлом не является технологическим концентратором напряжений и не снижает усталостную прочность.

Внедрение результатов проведенных исследовательских работ в серийное производство позволило сократить закупку дорогих импортных запасных частей к силовым агрегатам, объектам военной техники, тепловозам, станкам и другим машинам и уменьшить капитальные затраты на создание специализированных участков для упрочнения деталей, а, следовательно, значительно сократить потребление энергоресурсов.

Обеспечивается повышение общей и контактной прочности, увеличение ресурса и уменьшение потерь энергии в машинах и их элементах минимум на 40 %.

Предложенные в работе теоретические разработки и технологические методы упрочнения являются открытыми для дальнейшего совершенствования.

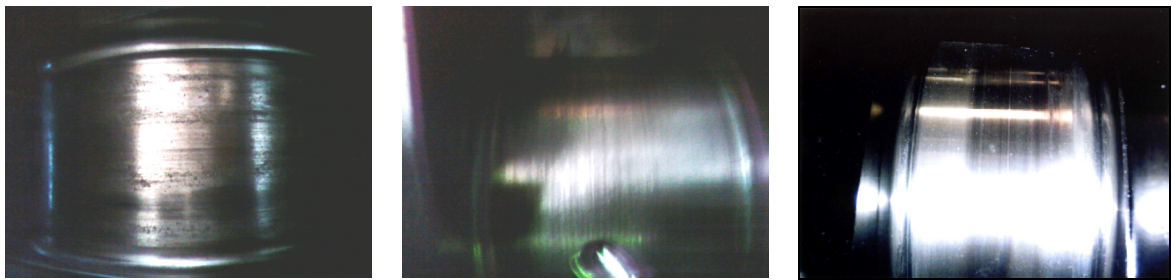


Рис. 1.5 – Кольцевой (абразивный) износ шейки коленчатого вала двигателя типа 5Д49

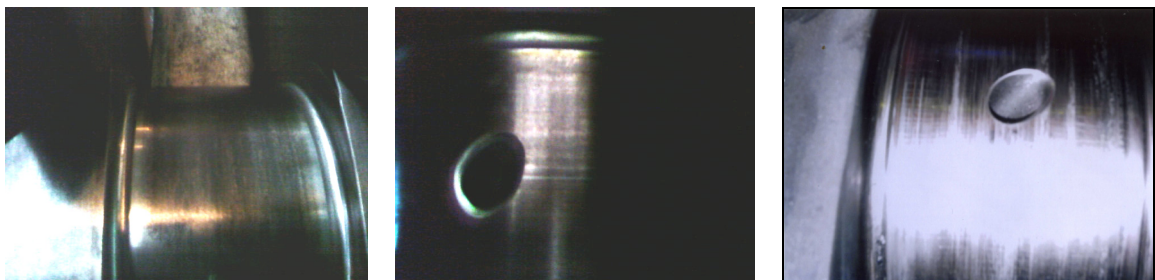


Рис. 1.6 – Усталостные трещины на шейке коленчатого вала двигателя типа 5Д49 в условиях ограниченной смазки



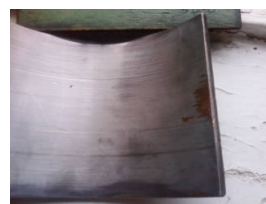
Вкладыш: износ приработанного покрытия



Перенос материала вкладыша на шейку



Микротрещины



Технологические дефекты: отслойка приработанного покрытия и его износ

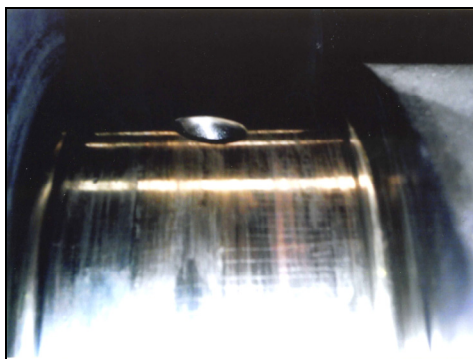
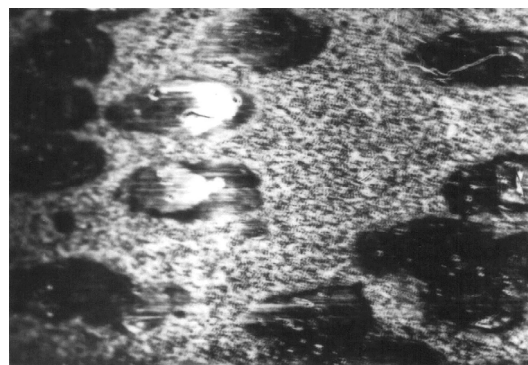
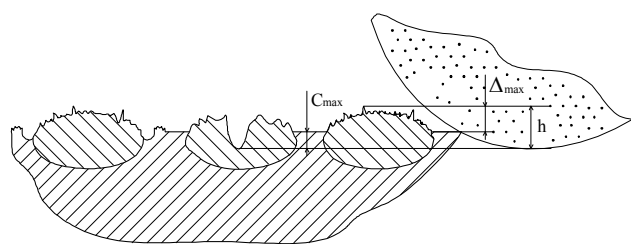


Рис. 1.7 – Усталостные трещины на шейке коленчатого вала двигателя типа 5Д49 в условиях интенсивной смазки и другие дефекты



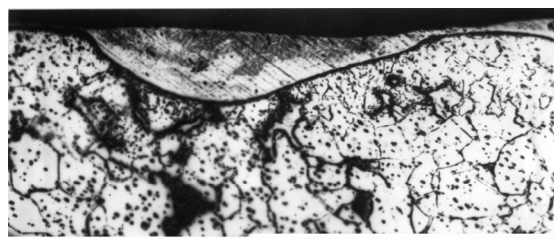
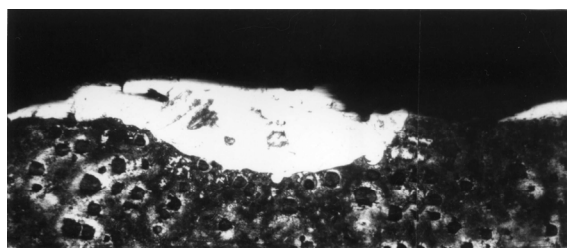
a

б

Рис. 3.3 – Формирование поверхности при шлифовании:
а – схема, б – расположение дискретных упрочненных областей; $\times 10$



Рис. 3.5 – Внешний вид изделия после ДЭУ до шлифования; $\times 3$



a

б

Рис. 3.6 – Микроструктура поперечного шлифа образцов
высокопрочного чугуна (*a*) и стали 42ХМФА (*б*) в зоне разряда; $\times 100$;
электрод – сталь 08Х18Н10Т



Рис. 3.7 – Микроструктура поперечного шлифа образца стали 45 в зоне разряда; $\times 100$; электрод – сталь 08X18H10T

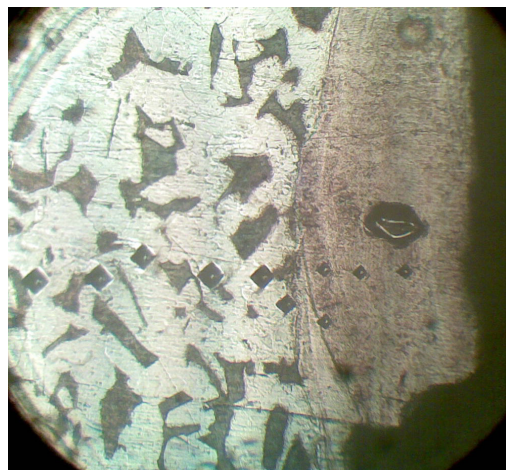
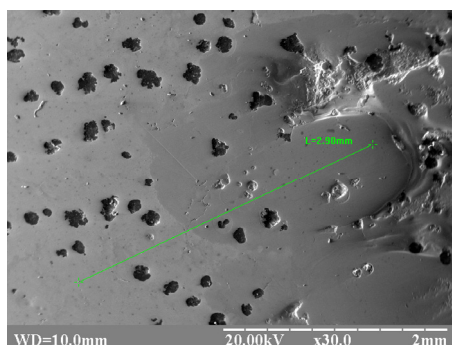
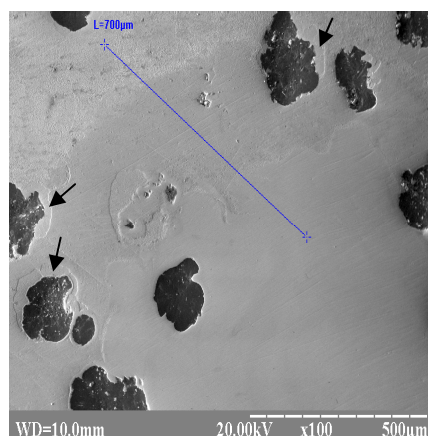


Рис. 3.8 – Структура стали 45 в зоне разряда; $\times 500$; электрод – сталь 08X18H10T



a



б

Основной металл

«белый» слой

Рис. 3.10 – Структура чугуна в зоне разряда: *a* – $\times 30$, *б* – $\times 100$ (сканирующая электронная микроскопия)

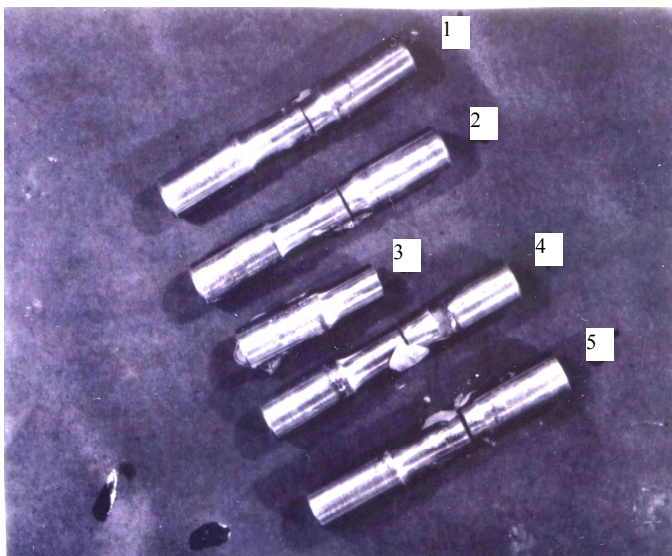
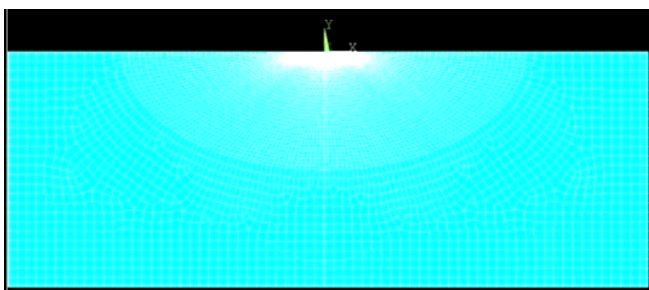
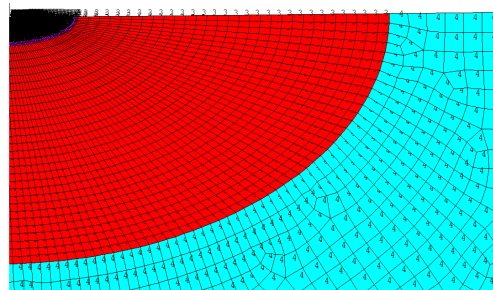


Рис. 3.21 – Разрушенные усталостные образцы:
1, 2 – после стандартной обработки;
3, 4 – после ДЭУ;
5 – образец из серийного чугуна



общая модель



фрагмент в области ДЗУ

Рис. 4.4 – Конечно-элементная модель

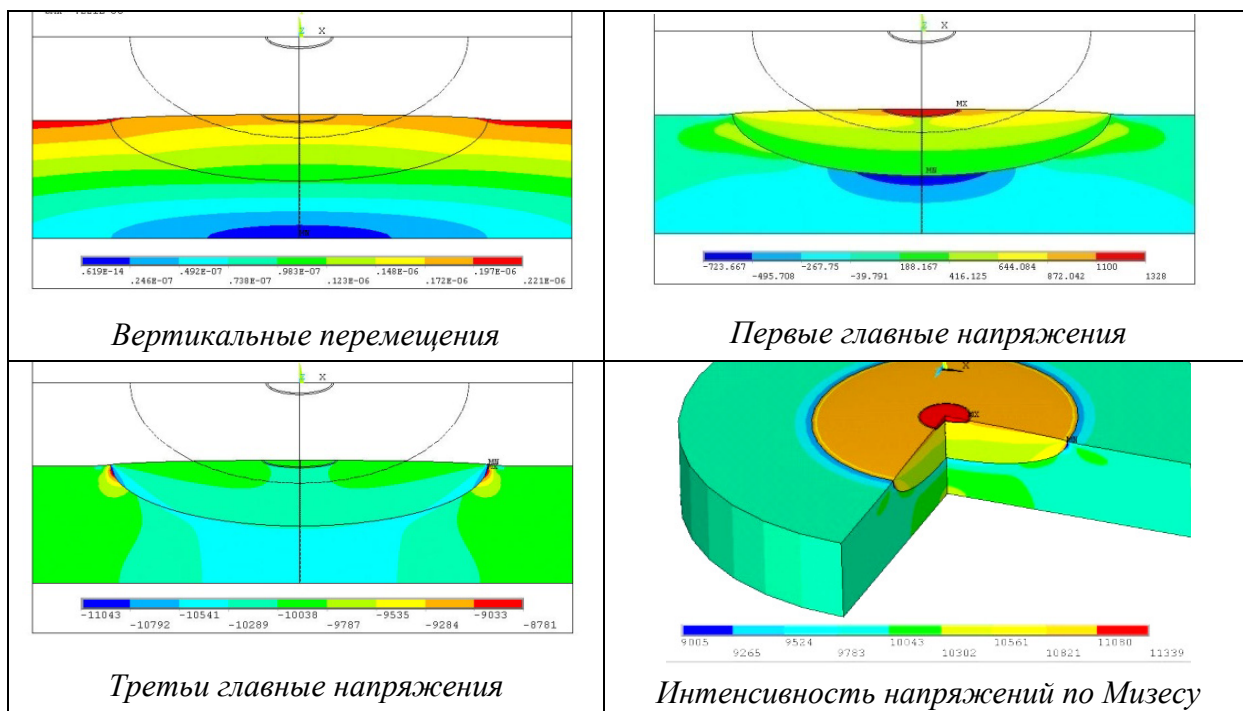


Рис. 4.5 – Компоненты НДС в области ДЗУ

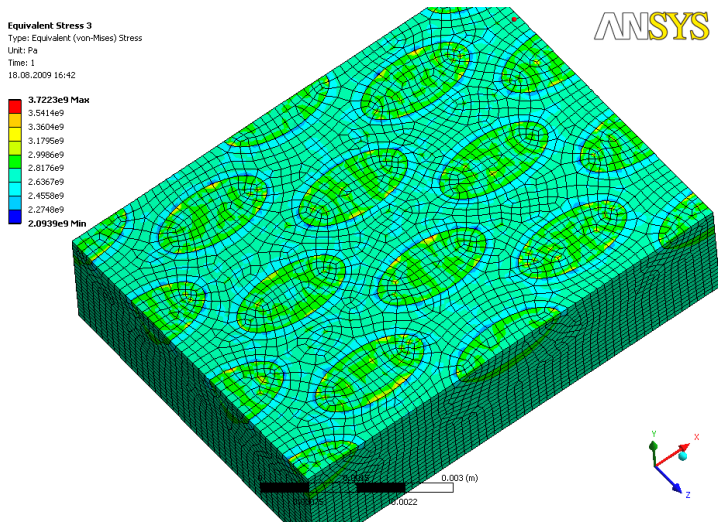


Рис. 4.6 – КЭМ
подповерхностного слоя
опорной части вала

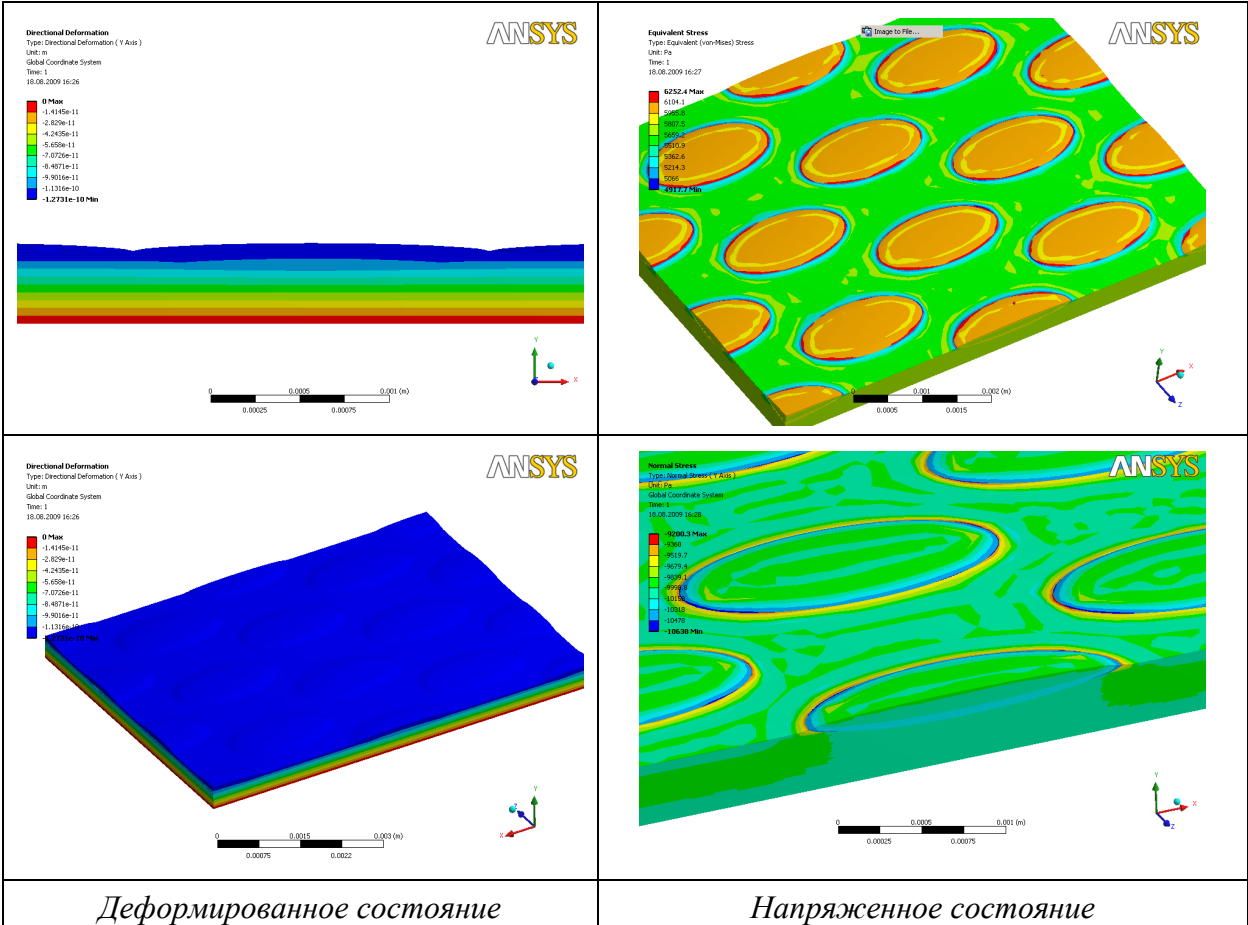


Рис. 4.7 – Картина перемещений и напряжений в приповерхностном слое детали

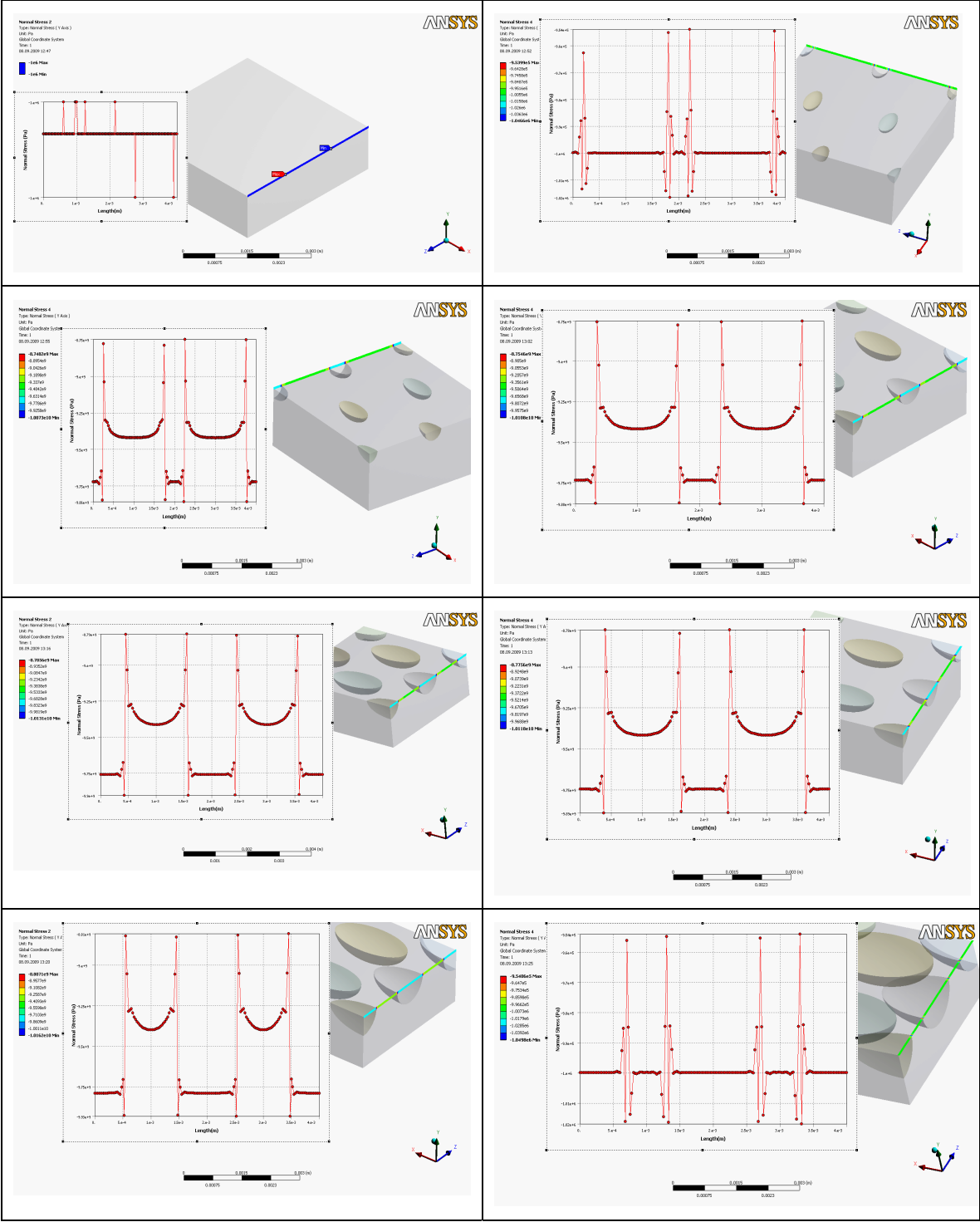


Рис. 4.9 – Картины распределения контактного давления в поверхностном слое детали

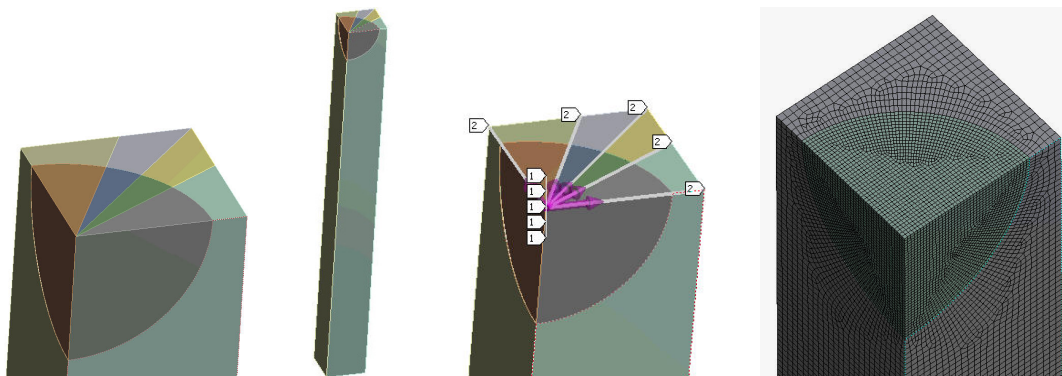


Рис. 4.10 – Расчетные схемы для задачи анализа НДС фрагмента детали с зоной дискретного упрочнения при действии на поверхность распределенного давления $p=100$ МПа

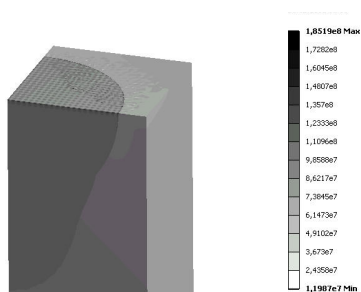


Рис. 4.12 – Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу

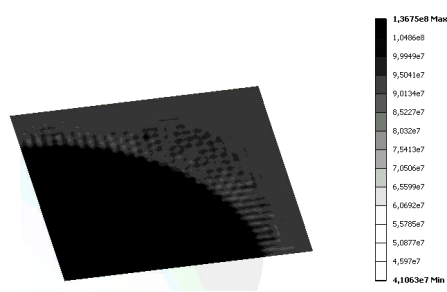


Рис. 4.13 – Распределение контактных давлений

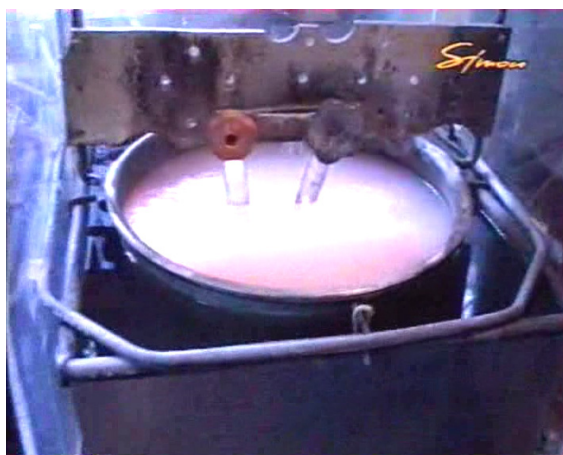


Рис. 5.36 – Фото электролитической ванны



Рис. 5.49 – Цилиндрическая поверхность поршня с корундовым слоем после наработки 50 моточасов

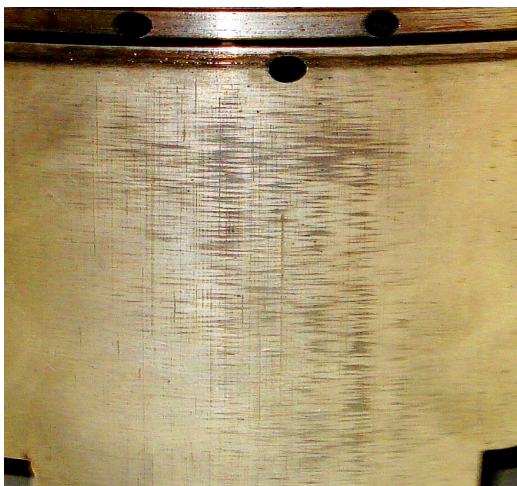


Рис. 5.45 – Боковая поверхность поршня СМД после испытаний и после корундирования



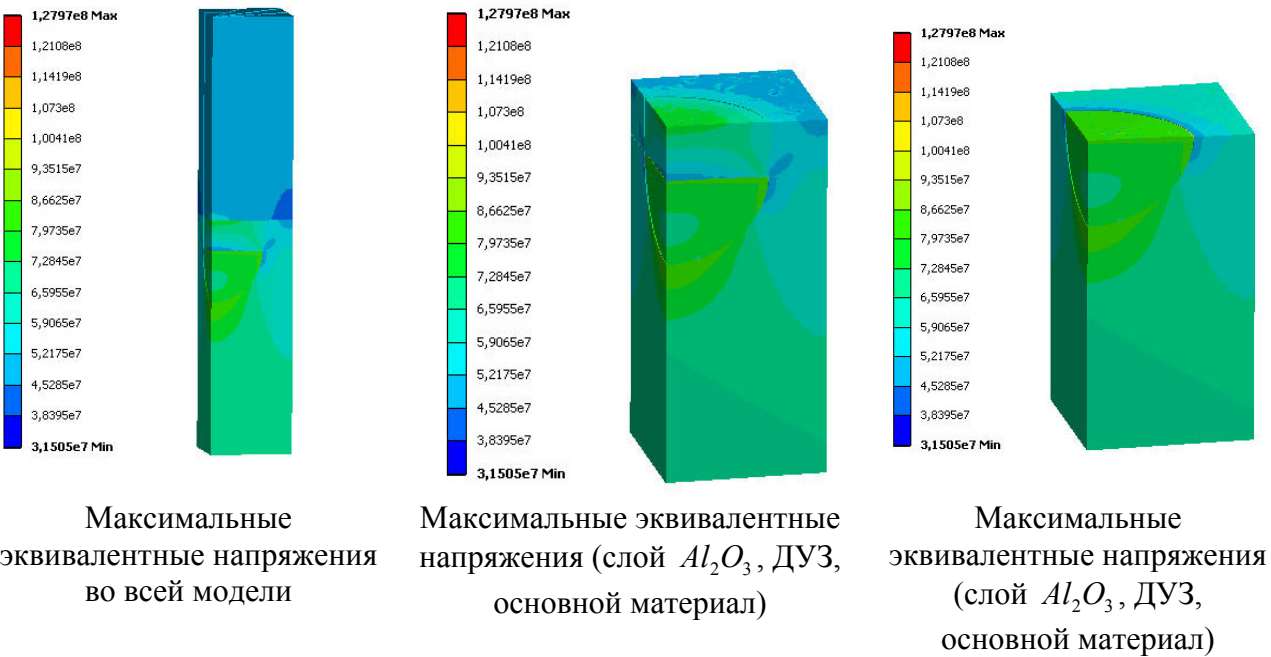
Рис. 5.46 – Цилиндрическая поверхность поршня из АЛ 25 до и после корундирования



Рис. 5.47 – Доньшко поршня из АЛ 25 до и после корундирования



Рис. 5.48 – Донушко и камера сгорания поршня с корундовым слоем



Максимальные эквивалентные напряжения во всей модели

Максимальные эквивалентные напряжения (слой Al_2O_3 , ДУЗ, основной материал)

Максимальные эквивалентные напряжения (слой Al_2O_3 , ДУЗ, основной материал)

Рис. 6.4 – Максимальные эквивалентные напряжения по von-Mises

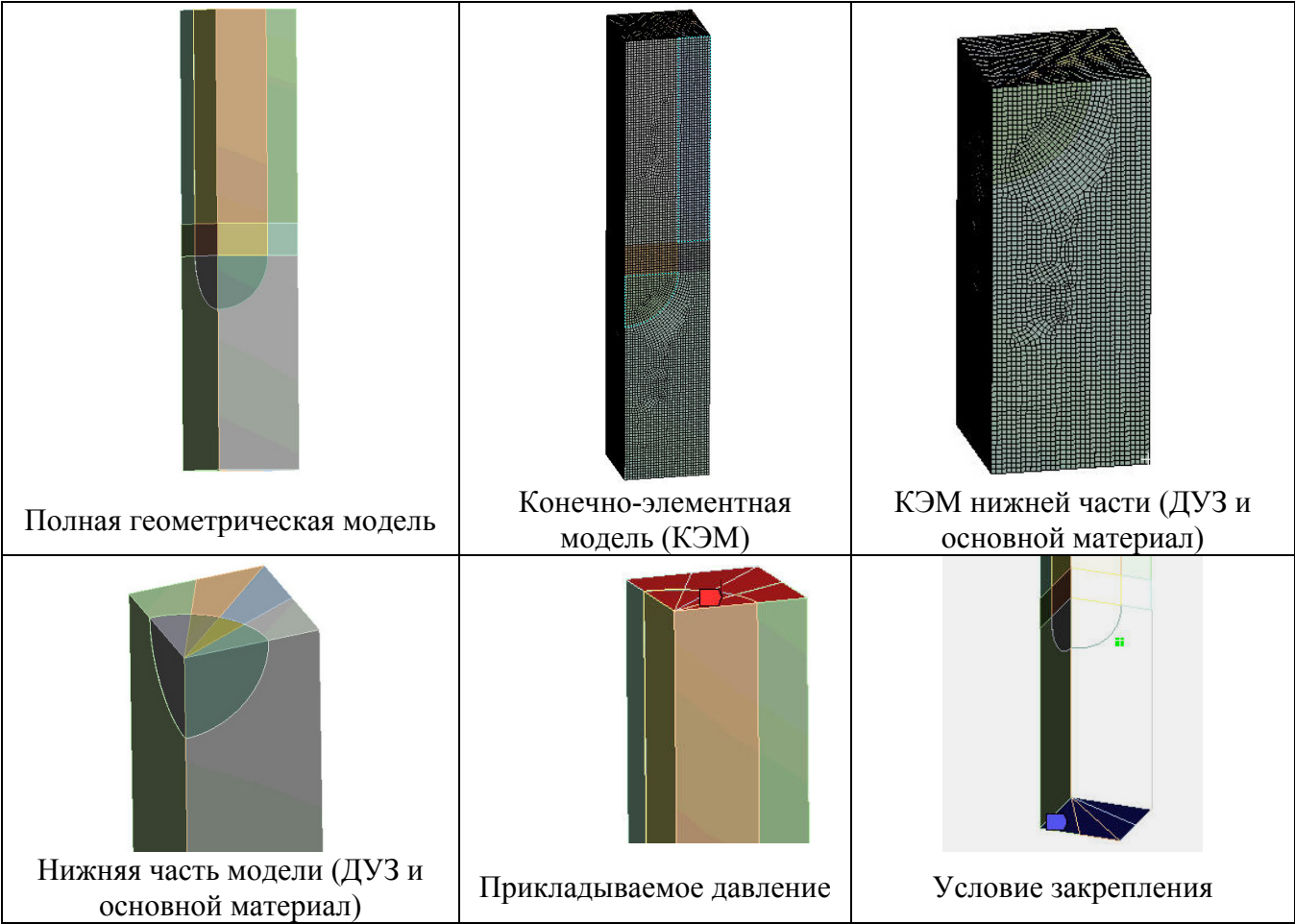
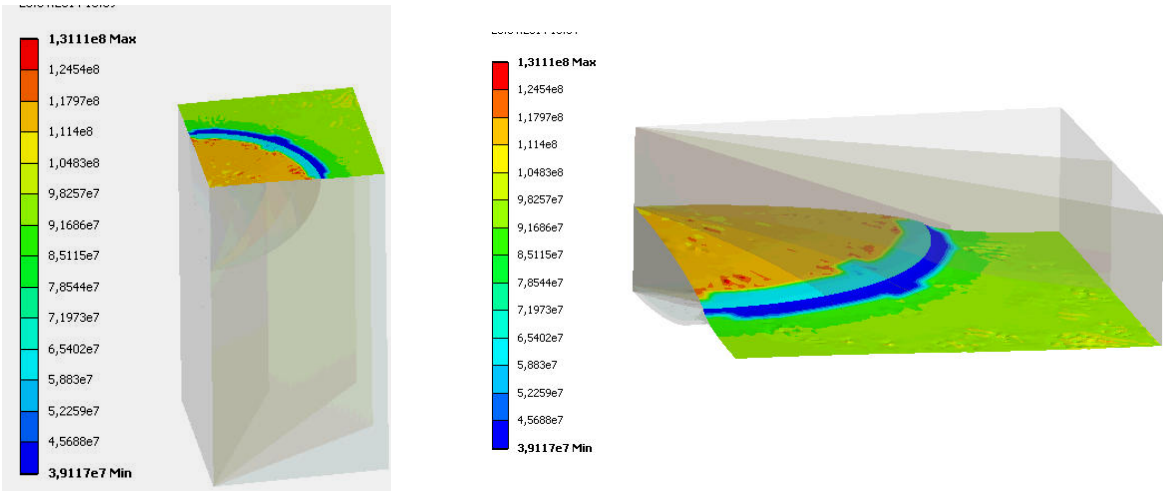


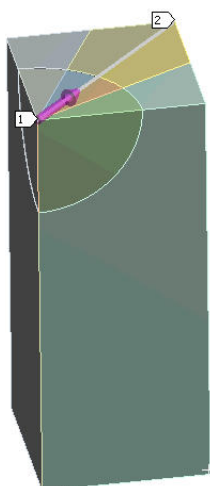
Рис. 6.3 – Геометрическая и конечно-элементная модели, внешние нагрузки: прикладываемое давление и закрепление



Контактные давления

Контактные давления (в масштабе, с 1500 кратным увеличением степени деформирования)

Рис. 6.5 – Контактные давления



Путь для определения перемещений

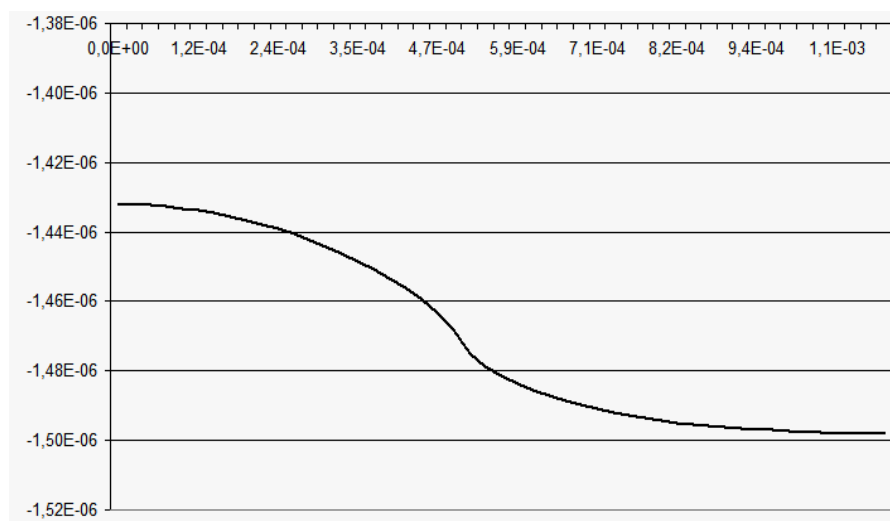
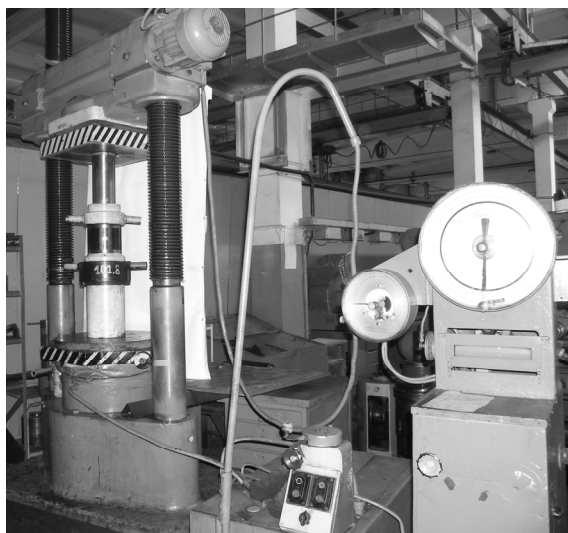


График перемещений (вдоль вертикальной оси отложены значения перемещений в м, а вдоль горизонтальной длина пути, т.е. длина вдоль диагонали модели, в м)

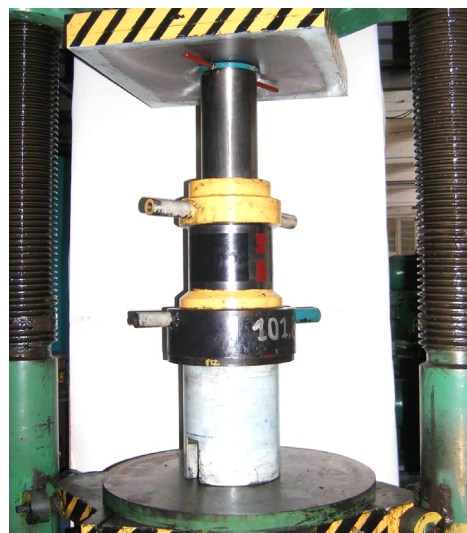
Рис. 6.6 – Путь для определения перемещений и график распределения перемещений вдоль осевой координаты по пути



Рис. 7.6–Разрез пары «поршень-шатун» после операции закатывания



а



б

Рис. 7.8 – Оснащение для редуцирования шлицевых втулок, установленное на гидравлическом прессе модели ИПС-200: а – общий вид; б – рабочее положение

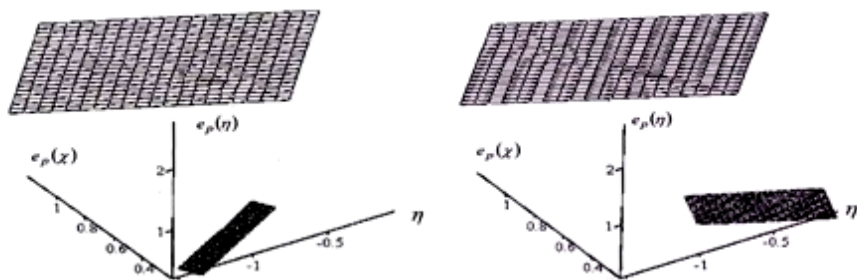


Рис. 7.12 – Плоскости деформирования областей, близких к разрушению (точки 2, 5) – $\bar{e}_u = f(\eta, \chi)$ и граничные поверхности $e_p = f(\eta, \chi)$



Рис. 7.13 – Гидравлический пресс усилием 200 кН



Рисунок. 7.14 - Установка для безводородного ионного азотирования для проведения линейного индентирования



а



б

Рис. 7.15 – Модули из исследований азотированного слоя:
а – на базе оптического микроскопа; б – на базе электронного микроскопа

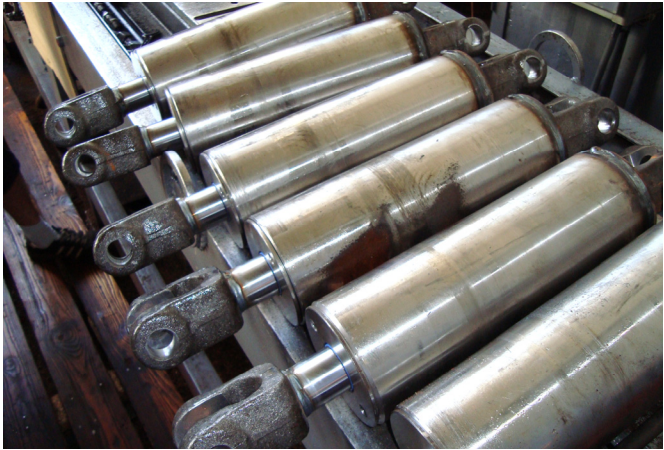


Рис. 7.23 –
Гидроцилиндры
Ц-100, изготовленные
с использованием
деформирующе-
режущего
протягивания

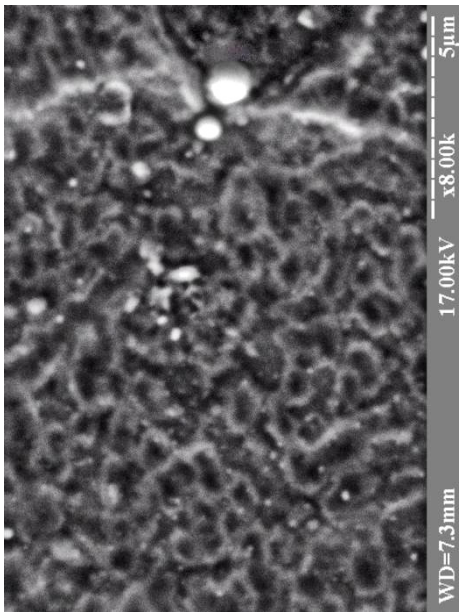
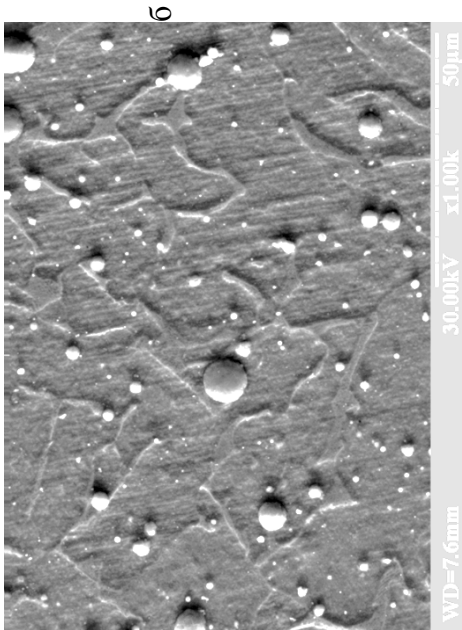
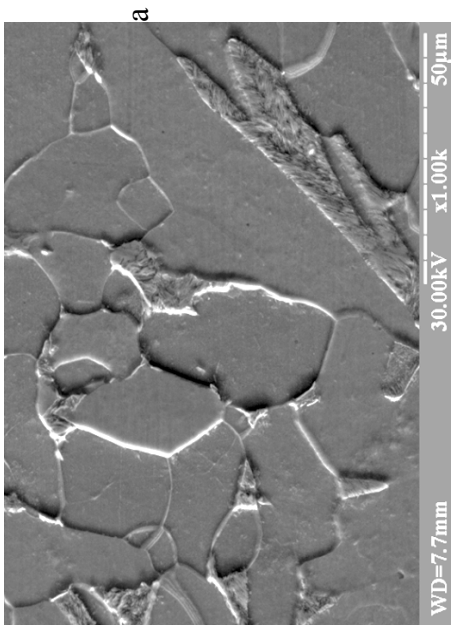


Рис. 8.8 – Микроструктура отожженной стали 20 до (а, в) и после (б, г) ИБ (сканирующая электронная микроскопия); а, б – x500; в, г – x10000

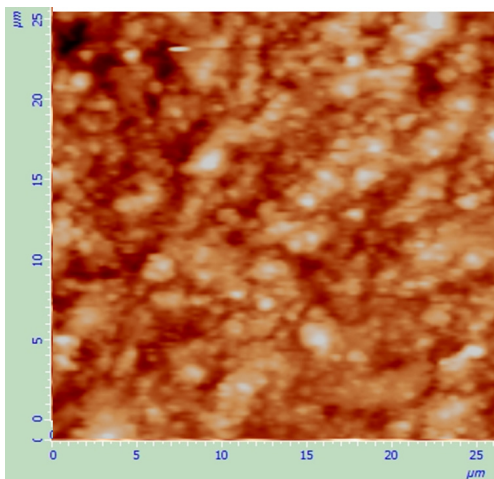
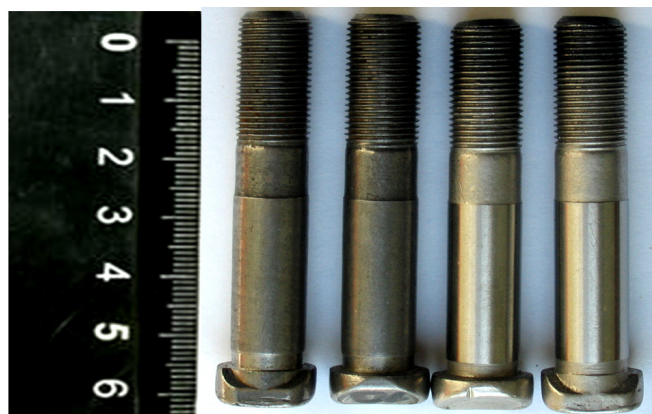
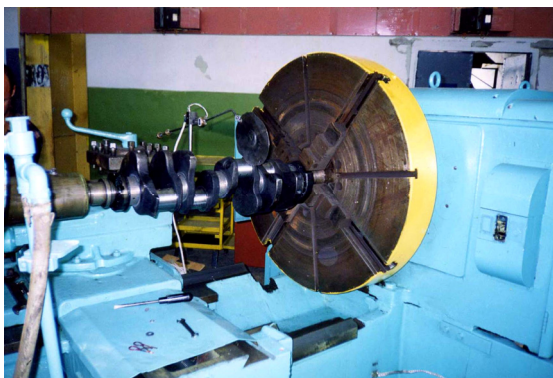


Рис. 8.9 – Топография поверхности образца после ИБ

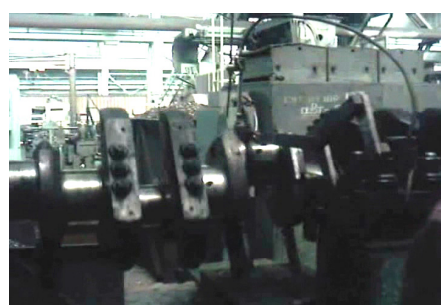
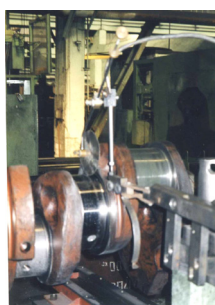


а б

Рис. 8.10 – Шатунные болты двигателя 3МЗ-406 в исходном состоянии (а) и после ИБ (б)



а



б

Рис 9.1 – Дискретно упрочненный коленчатый вал двигателя КамАЗ 740 и боевая машина «Град» с восстановленным двигателем (а) и магистральный тепловоз 2ТЭ10М с модернизированным двигателем (б)

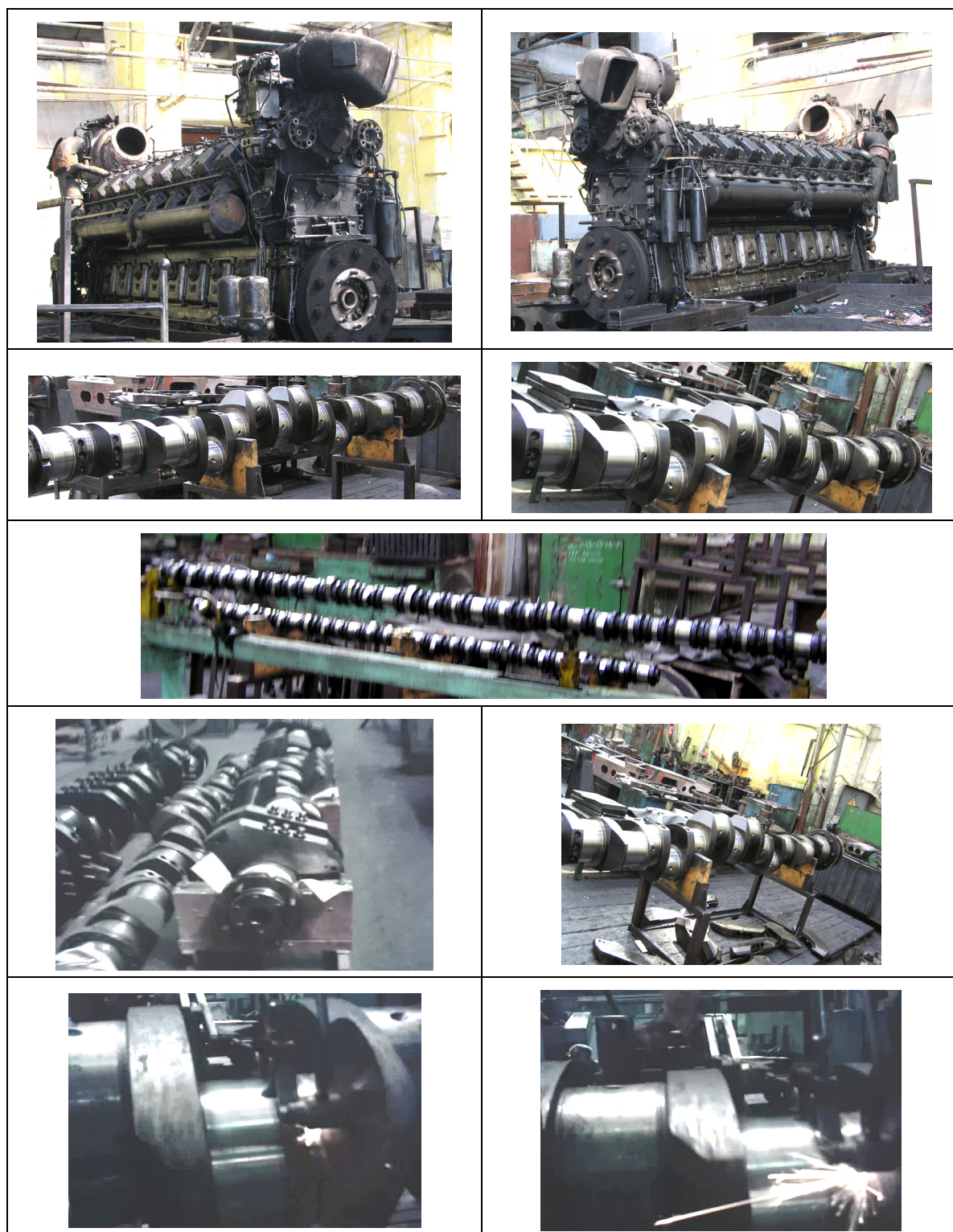


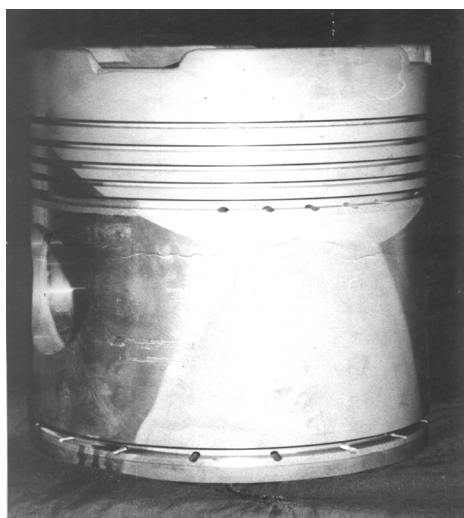
Рис. 9.2 – Объекты восстановления путем дискретного упрочнения на ОАО "Изюмский тепловозремонтный завод» и рабочие моменты процесса



Рис. 9.4 – Поршень с корундовым слоем после эксплуатации 114676 моточасов



Рис. 9.7 – Серийный поршень дизеля после эксплуатации 46512 моточасов



а



б

Рис. 9.25 – Поршень с корундовым слоем дизеля тепловоза ЧМЭ-3:
а – до испытаний, *б* – после наработки 114676 моточасов

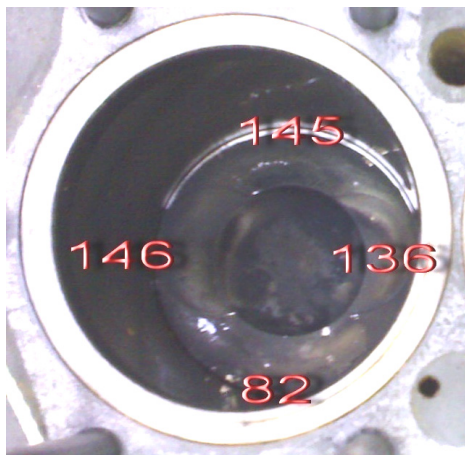


а

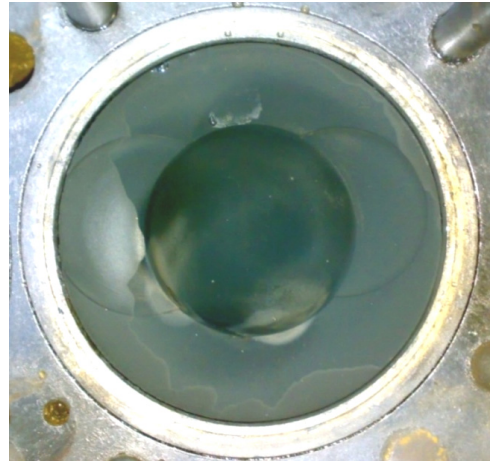


б

Рис. 9.32 – Серийный поршень дизеля тепловоза ЧМЭ-3 № 6835:
а – после наработки 47520 моточасов, *б* – нагар на головке поршня



а



б

Рис. 9.43 – Толщина нагара на головке серийного поршня после испытаний (а), головка поршня с корундовым слоем после испытаний без нагара (б)



Рис. 9.58 – Внедрение способов упрочнения элементов двигателей: боевые машины «Мустанг», БТР 43269, машины серии БАЗ - ГП МОУ «ХАРЗ 110»

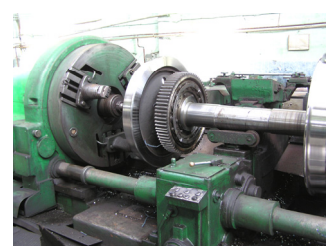


Рис. 9.59 – Внедрение способов упрочнения элементов конструкций и агрегатов трамвайных вагонов, троллейбусов, колесных пар подвижного состава железных дорог – Коммунальное предприятие «Вагоноремонтный завод», Изюмский тепловозоремонтный завод

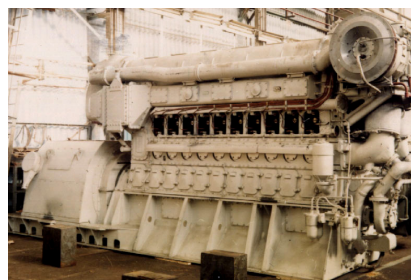
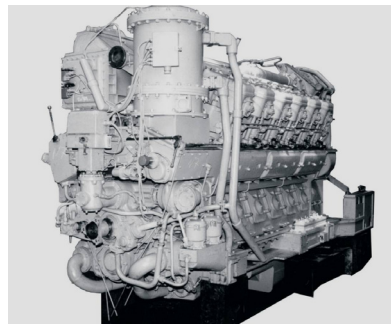
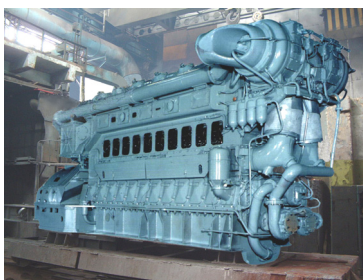
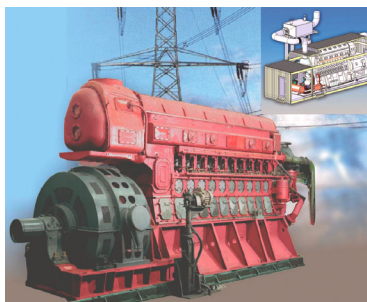
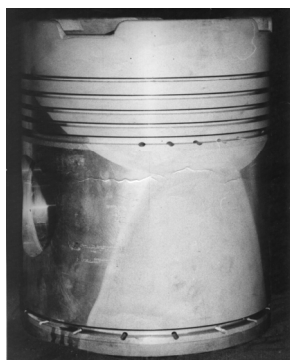


Рис. 9.60 – Внедрение способов упрочнения элементов конструкций форсированных двигателей - ГП «Завод им. В.А. Малышева»



Поршень



Новый поршень, 1993 г.



2005 г., наработка
97680 моточасов



2009 г., наработка
114676 моточасов



2012 г., наработка
125 тыс. моточасов

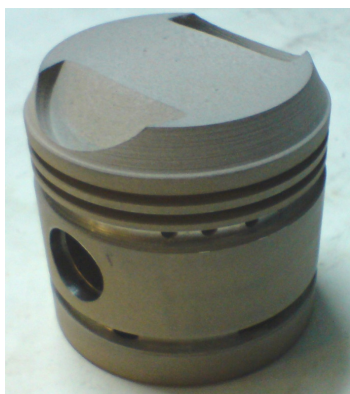
Рис. 9.61 – Пример
применения
корундирования: поршень
дизеля K6S310DR,
обработанный по
предлагаемой технологии



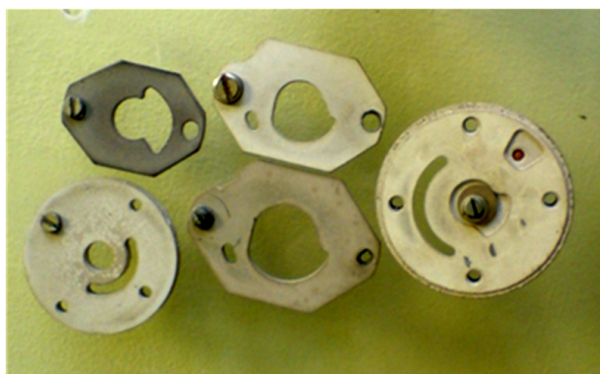
Поршень двигателя АИ 14 с
корундовой поверхностью



Поршни Бригс энд Стрекшн, 2000 г.
с корундовой поверхностью



Поршень мотоцикла



Пластины электробензонасоса

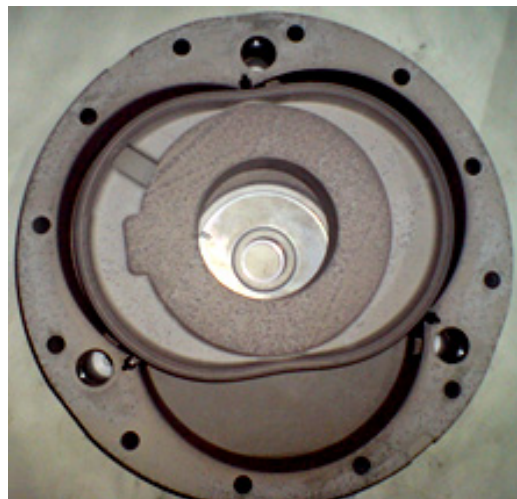


После обработки поршень мотоцикла и
поршни Багги с корундовой
поверхностью 18.04.12.

Рис. 9.62 – Примеры деталей, обработанных по предлагаемой технологии
корундирования



Гильза и поршень для двухместного самолета с корундовой рабочей поверхностью



Статор и ротор роторного двигателя



Насос

Рис. 9.63 – Примеры деталей, обработанных по предлагаемой технологии корундирования

Монографія

ТКАЧУК Микола Анатолійович
Д'ЯЧЕНКО Світлана Степанівна
ПОСВЯТЕНКО Едуард Карпович
КРАВЧЕНКО Сергій Олександрович
ГОНЧАРОВ Віктор Григорович
ШПАКОВСЬКИЙ Володимир Васильович
БЄЛОВ Микола Львович
ШЕЙКО Олександр Іванович
ОЛЕЙНИК Олександр Купріянович
ПОНОМАРЕНКО Ігор Володимирович

КОНТИНУАЛЬНА І ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНА МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Видавництво ТОВ «Щедра садиба плюс»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
серія. ДК № 4666 від 18.12.2013р.



Підписано до друку 10.03.2015. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний.
Ум.друк.арк. 23,33 Зам. № 10/032015
Тираж 300 прим.

Друкарня: ФОП Томенко Ю.І., м. Харків, пл. Руднева, 4, Тел. 757-93-82